



85

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

"COMUNICACIONES. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN  
POR FIBRA ÓPTICA"

TRABAJO DE SEMINARIO  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

ALFONSO RIVERO MILPAS

ASESOR: ING. JORGE RAMÍREZ RODRÍGUEZ

*2000*

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2000



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

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

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
PRESENTE.

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES-C.

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.  
sistemas de transmisión por fibra óptica.

que presenta el pasante: Alfonso Rivero Milpas,  
con número de cuenta: 9001188-2 para obtener el Título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

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

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 18 de Mayo de 2000.

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>I</u>	<u>Ing. Juan González Vega</u>	<u>[Firma]</u>
<u>II</u>	<u>Ing. Jorge Ramírez Rodríguez</u>	<u>[Firma]</u>
<u>IV</u>	<u>Ing. Alfonso Contreras Márquez</u>	<u>[Firma]</u>

A MIS PADRES

QUE CONTRIBUYERON CON SUS CONSEJOS. APOYO Y ESFUERZOS A LA REALIZACIÓN DE MIS ESTUDIOS. GRACIAS.

AL INGENIERO JORGE RAMÍREZ RODRÍGUEZ

QUIEN CON SU APOYO Y EXPERIENCIA ME GUIO A LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO. QUE CONSTITUYE LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLAR LA PRACTICA DE MIS ESTUDIOS.

A MIS HERMANOS

QUE ME APOYARON EN TODO MOMENTO

A YESSICA

QUE SIN SU APOYO NO HUBIERA PODIDO REALIZAR MIS SUEÑOS.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

QUE ME HA DADO TODO SIN PEDIR NADA A CAMBIO

# SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR FIBRA OPTICA

## INDICE

	Pág.
<b>Cap.1</b> Introducción a los sistemas de transmisión por fibra óptica.....	1
Reseña histórica de las telecomunicaciones.....	1
Sistemas de telecomunicaciones.....	3
Descripción general.....	4
Ventajas y desventajas de las fibras ópticas.....	5
<b>Cap. 2</b> Aspectos generales de las fibras ópticas.....	6
Propagación.....	7
Reflexión.....	8
Refracción.....	9
Ley de SNELL.....	9
Parámetros característicos de las fibras ópticas.....	11
Apertura numérica.....	11
Perfil de índice de refracción.....	12
Parámetros geométricos.....	12
Atenuación.....	13
Dispersión temporal.....	15
Optimización de las características de transmisión.....	16
Tipos de fibra óptica.....	18
<b>Cap. 3</b> Elementos de un sistema de transmisión por fibra óptica.....	19
Descripción.....	20
Tipos de cables ópticos.....	20
Características de las fibras ópticas según su fabricación.....	23
Características de las fibras ópticas.....	24
Tabla de características de cables de fibras ópticas.....	25
Tipos de empalme.....	26
Tipos de conectores.....	35
Emisor y receptor óptico.....	42
Configuración de una terminal óptica.....	42
Configuración de un sistema.....	43
Configuración OLTE.....	44
Diodo electroluminiscente (LED).....	45
Diodo láser.....	46
Diodos receptores.....	48
Conectores ópticos.....	50
<b>Cap. 4</b> Etapa de transmisión y recepción.....	51
Transmisión de señales analógicas.....	51
Transmisión por medio de señales discretas.....	51
Muestreo.....	52

	Pag.
Transmisión por pulsos.....	52
Modulación de pulsos.....	52
Demodulación.....	55
Transmisión por codificación de pulsos.....	56
Cuantización y codificación.....	56
Otros códigos.....	58
Códigos de línea.....	58
Rapidez de transmisión.....	60
Demodulación.....	60
Regenerador intermedio.....	60
Técnicas de sistemas periféricos.....	60
Regenerador intermedio.....	62
Repetidores de central.....	64
Separación de repetidores.....	64
Preamplificadores.....	65
Medición de potencias ópticas.....	67
<b>Cap. 5</b> Diseño de un sistema de comunicación por fibra óptica.....	<b>68</b>
Cálculo de la banda de paso o tiempo de subida requerido.....	69
Tiempo de subida de la fuente óptica.....	70
Pérdidas por acoplamiento de conectores.....	70
Problema.....	71
Cálculo de margen de potencia.....	71
 Glosario.....	 74
 Conclusiones.....	 76
 Bibliografía.....	 77

## Cap.1 Introducción a los sistemas de transmisión por fibra óptica

### Reseña histórica de las telecomunicaciones

Desde el principio de la humanidad, a través de las distintas civilizaciones, el hombre ha buscado lograr la transferencia de información, entre distintos lugares, más rápida, barata y conveniente. Esta característica lo ha llevado al desarrollo de diversos sistemas de comunicación, desde los tambores y señales de humo hasta los satélites de telecomunicaciones y las fibras ópticas.

En muchos sentidos, la tecnología de los dispositivos de fibra óptica es descendiente directa del telégrafo. No obstante el escaso desarrollo de los dispositivos de fibra óptica, los antecedentes se remontan a muchos años atrás. Es probable que una gran cantidad de gente observó la propagación de la luz mediante fibras ópticas mucho antes de que se hiciera cualquier uso práctico del fenómeno.

La primera demostración aceptada de que la luz sigue a un medio transparente curvo, es acreditada a John Tyndall, en 1870. Durante una conferencia ante la Sociedad Real Inglesa (British Royal Society), Tyndall mostró este fenómeno. La demostración sorprendió a la mayoría, ya que el hecho de que la luz viajara en línea recta era bien conocido; podía cambiar de dirección al ser reflejada y doblar considerablemente al ir de un medio a otro, como del aire al agua o del aire al vidrio. Este era un fenómeno ampliamente conocido y descriptible matemáticamente mediante las leyes de reflexión o refracción; no obstante, aun en el segundo medio, la trayectoria era otra vez en línea recta.

En 1880, Alexander Graham Bell llevó a cabo un considerable número de experimentos con un dispositivo llamado fotófono. El mismo Bell consideró que el fotófono era un invento más importante que el teléfono, debido a que no requería de cables para conectar el transmisor con el receptor. Desafortunadamente, el fotófono estaba adelantado a su tiempo, ya que la tecnología para desarrollarlo no estuvo disponible durante algunos años. Anterior al invento de la luz eléctrica, Bell tuvo que usar rayos solares, redirigidos mediante espejos, para iluminar el diafragma que ejecutaba la función de modulador en el fotófono.

El heliógrafo o telégrafo de luz solar fue usado por fuerzas navales y navíos para enviar mensajes sin el uso de cables; no obstante, poco se hizo en transmisión de voz sobre ondas luminosas, excepto por el "Lightsprecher", usado por la armada alemana durante la Segunda Guerra Mundial. En 1910, Hondros y Debeye publicaron estudios sobre guías de ondas en dieléctricos, desde el punto de vista teórico. Otros estudios teóricos sobre la transmisión de la luz fueron realizados en la década de 1920 a 1930.

Prácticamente, este campo se abrió hasta los años 50, cuando Van Heel, Hopkins y Kapany, desarrollaron el fibroscopio flexible (Flexible Fiberscope). En este trabajo, Kapany desarrolló la primera fibra óptica. El fibroscopio fue un dispositivo muy útil y su mayor



característica era su flexibilidad: el dispositivo permitía ver en esquinas y en obstáculos curvos (la imagen no se distorsionaba cuando la fibra se anudaba varias veces).

El uso del fibroscopio para la impresión dentro de reactores y de cámaras de combustión no puede ser superado por otro medio. Igual de significativo resulta su uso en el campo de la medicina, ya que su dimensión y flexibilidad facilitan la exploración de órganos, sin necesidad de la cirugía.

Desde el punto de vista de las comunicaciones, faltaban algunas piezas significantes. No existía forma práctica de obtener algún nivel de potencia de la luz importante en las delgadas fibras. En 1958, la invención del láser, por Townes, hizo posible llevar a cabo este proceso eficientemente.

El láser ofreció la posibilidad de contar con una fuente extremadamente intensa de luz coherente monosomática de extensión angular y física muy pequeña. Por primera vez existió la facilidad de cargar potencias de luz medidas en watts en una sola fibra óptica. A este desarrollo siguió una serie de experimentos, hasta que, en 1967, las pérdidas en fibras fueron reportadas en 1 000 dB/Km. En 1970, Kapson, Keck y Mauren anunciaron un importante progreso con fibras de menos de 20 dB.Km de atenuación. En la actualidad, existen fibras ópticas prácticas con pérdidas de 1 dB/Km, y de menos en experimentación.

Además de los adelantos en las fibras ópticas, los fabricantes de equipos de telecomunicaciones ofrecen transmisores y receptores que aceptan niveles de entrada/salida TTL a varios niveles de vídeo. Asimismo, gran número de firmas fabricantes de conectores empiezan a ofrecer sus productos para conectar transmisores y receptores a las fibras. No obstante, se requiere estandarizar la especificación de los productos necesarios. Sin embargo, se puede afirmar que en un futuro próximo estarán disponibles conectores estandarizados.

La importancia básica de las fibras ópticas en la industria telefónica se sustenta en dos ventajas fundamentales: logística y económica.

Considerando el primer punto, esta es la característica más viable de realizar en un futuro inmediato. La mayoría de las grandes ciudades tienen inversiones considerables en plantas fijas respecto a cables; además, la demanda del servicio telefónico continúa creciendo a una tasa relativamente estable en el ámbito mundial, de cinco por ciento anual. Un cable de fibras ópticas con la presente tecnología ofrece el manejo de más de 20 veces el tráfico que puede manejarse con cables de cobre, e, incluso, puede pensarse en adelantos futuros, con factores multiplicadores de 10 hasta 100.

El costo de metro por cable de fibras ópticas se vuelve competitivo con el del cable de cobre; no obstante, el equipo terminal es mucho más costoso. La ventaja fundamental de las troncales telefónicas de fibras ópticas estriba en la posibilidad de expandir las capacidades del sistema, para satisfacer necesidades futuras, sin necesidad de realizar excavaciones.

En términos económicos, las ventajas de las fibras ópticas podrán verse a futuro. El gasto en el equipo terminal requerido para transmisión por fibra óptica decrecerá muy rápidamente, sobre la curva típica de los dispositivos de estado sólido. Para los cables, es previsible un decremento muy rápido de los costos. Los cables troncales telefónicos actuales tienen un precio que está directamente relacionado con el costo del cobre, de hecho, la materia prima "cobre" cuesta casi la mitad del total del cable. Los cables de fibra óptica, por otro lado, tienen otro elemento: la fibra de vidrio o plástico. El vidrio se cuenta entre las sustancias más baratas conocidas por el hombre. El tratamiento requerido para convertir la arena ordinaria en fibra óptica es un proceso extremadamente sofisticado que requiere maquinaria costosa.

Sin embargo, en un cable largo, la fibra representa una mínima porción del material: la mayoría de elementos en el cable son plásticos y miembros reforzados con acero.

Comparados con los cables telefónicos de cobre, de la misma capacidad de información, estos materiales son usados en cantidades mucho menores, debido a que el cable, en sí, es más pequeño.

Si la operación de la fibra de vidrio sigue la historia del crecimiento del cristal de silicón, se espera que el costo de las fibras caiga rápidamente, al producirse grandes volúmenes de fibra, diluyendo el costo de capital de la planta y los costos de investigación y desarrollo.

En la industria, el uso creciente de automatización y sofisticación en el monitoreo a servido para multiplicar el número de cables al rededor de plantas y factorías. En estos casos, usando multiplexaje en tiempo de datos, las guías de onda por fibra óptica liberan a la compañía de la complejidad y confusión del cableado existente. También se ofrece completa ausencia de interferencia electromagnética.

## **Sistemas de telecomunicaciones**

La comunicación se define como la transmisión de información de un lugar a otro. Esta transmisión se hace entre un emisor y un receptor. La información se presenta bajo la forma de diversas señales que tienen un significado preciso para el emisor y para el receptor. Si la comunicación se hace directamente entre dos personas dichas señales pueden ser sonidos o imágenes, o bien, pueden ser señales eléctricas si la comunicación se hace entre dos aparatos electrónicos. Las señales pueden tomar una forma particular (código) cuyo sentido lo conocen tanto emisor como el receptor.

Las telecomunicaciones se definen como comunicaciones a distancia. Por tanto, se excluyen las comunicaciones directas entre dos personas por medio de la voz o de la vista, las cuales sólo son posibles a corta distancia. Así pues, las señales que se van a transmitir serán señales eléctricas.

## Descripción general

Un sistema de telecomunicaciones se compone de tres elementos principales:

- a) el emisor,
- b) la vía o canal de comunicación,
- c) el receptor.

El emisor tiene las siguientes funciones:

- 1) transformar en información eléctrica  $e(t)$  la información que se transmitirá,
- 2) modificar esta información eléctrica para que pueda transmitirse a distancia,
- 3) transmitir esta información por la vía o canal de comunicación.

La vía o canal de comunicación tiene la función de transportar la información entre el emisor y el receptor. Esta vía de comunicación puede consistir en:

- 1) hilos eléctricos,
- 2) cables coaxiales,
- 3) guías de ondas,
- 4) ondas electromagnéticas libres emitidas por una antena,
- 5) fibras ópticas.

El receptor cumple con las funciones inversas de las del emisor:

- 1) detectar la información transmitida por el canal de comunicación,
- 2) transformar esta información en información eléctrica  $e(t)$ ,
- 3) transformar la información eléctrica en información sonora o visual, en caso de ser necesario.

En las telecomunicaciones electrónicas, el emisor no cumple más que con las funciones de modificación y transmisión de la señal  $e(t)$ , mientras que el receptor sólo realiza la función de detección que produce una señal  $e(t)$  utilizable.

En estos sistemas de telecomunicación deben responder a exigencias particulares como:

- 1) tener una capacidad máxima de transferencia de información.
- 2) ser de fácil utilización.
- 3) ser fiables.
- 4) tener el menor costo posible.

### **Ventajas y desventajas de las fibras ópticas**

En general, las ventajas que ofrecen las fibras ópticas se pueden resumir como sigue:

- a) No existe la diafonía.
- b) No puede ser interferida.
- c) Tiene un ancho de banda amplio.
- d) Totalmente dieléctrica.
- e) Capacidad de multiplex amplio.
- f) Tamaño pequeño, poco peso, soporta grandes tensiones y tiene mucha flexibilidad.
- g) Atenuación baja, independiente de la frecuencia.
- h) Inserción en conductos parcialmente ocupados.
- i) Baja fuerza de introducción en conductos.
- j) Resistencia a la corrosión.
- k) Ausencia de cortos circuitos por descargas eléctricas, chispas, etc.

En general, las desventajas que tienen las fibras ópticas se pueden resumir como sigue:

- a) Puede resultar más caro si sus ventajas no son correctamente valuadas.
- b) Las pérdidas de acoplamiento y su dificultad en aplicaciones de campo por el pequeño tamaño de las fibras ópticas.
- c) Algunas fuentes luminosas tienen una vida útil muy limitada, ejemplo (láser).

Las futuras aplicaciones del sistema de transmisión por fibra óptica dependen esencialmente de las ventajas observadas con su uso, en relación con otros medios de transmisión.

Se puede deducir, de acuerdo con las características expuestas, que su existencia se desarrollara con excelentes resultados ya que permitirá una serie de nuevos servicios de banda ancha dentro del dominio de la telemática y de la burótica:

Facsímil de alta velocidad y telecopia.

Teletext y videotex.

Telefonía visual.

Redes integradas de comunicación.

## Cap. 2 Aspectos generales de las fibras ópticas

Con la invención del láser como fuente de luz coherente, se volvió a considerar la idea de utilizar la luz como soporte de comunicaciones como sistema alternativo o sustitutivo de los existentes, formulando al mismo tiempo los primeros conceptos sobre transmisión por fibra de vidrio como guía de onda.

En sistemas de comunicaciones digitales resulto particularmente atractiva, ya que con una fuente láser disparada alta velocidad se pueden transmitir los unos y los ceros de una comunicación digital hacia un receptor.

Poco después, en 1975 aparecerían los primeros proyectos experimentales instalándose de modo creciente a partir de 1980. Por lo que actualmente la fibra óptica es el medio de comunicaciones terrestre de mayores prestaciones y más alta potencialidad.

La fibra óptica es un medio de transmisión de información analógica o digital, en la cual sus principios básicos de funcionamiento se justifican de forma clara, aunque poco rigurosa aplicándole las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra ,hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell.

Básicamente la fibra óptica esta compuesta de:

Parte	Descripción
Núcleo	Compuesta por una región cilíndrica, por la cual se efectúa la propagación de la luz (que puede ser de vidrio o de plástico).
Revestimiento	La zona externa y coaxial con el núcleo, totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación, y que se denomina envoltura o revestimiento que es solo de plástico.

Las futuras aplicaciones del sistema de transmisión por fibra óptica dependen esencialmente de las ventajas observadas con su uso, en relación con otros medios de transmisión.

Se puede deducir, de acuerdo con las características expuestas, que su existencia se desarrollara con excelentes resultados ya que permitirá una serie de nuevos servicios de banda ancha dentro del dominio de la telemática y de la burótica:

Facsimil de alta velocidad y telecopia.

Teletext y videotex.

Telefonía visual.

Redes integradas de comunicación.

## Cap. 2 Aspectos generales de las fibras ópticas

Con la invención del láser como fuente de luz coherente, se volvió a considerar la idea de utilizar la luz como soporte de comunicaciones como sistema alternativo o sustitutivo de los existentes, formulando al mismo tiempo los primeros conceptos sobre transmisión por fibra de vidrio como guía de onda.

En sistemas de comunicaciones digitales resulto particularmente atractiva, ya que con una fuente láser disparada a alta velocidad se pueden transmitir los unos y los ceros de una comunicación digital hacia un receptor.

Poco después, en 1975 aparecerían los primeros proyectos experimentales instalándose de modo creciente a partir de 1980. Por lo que actualmente la fibra óptica es el medio de comunicaciones terrestre de mayores prestaciones y más alta potencialidad.

La fibra óptica es un medio de transmisión de información analógica o digital, en la cual sus principios básicos de funcionamiento se justifican de forma clara, aunque poco rigurosa aplicándole las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra, hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell.

Básicamente la fibra óptica esta compuesta de:

Parte	Descripción
Núcleo	Compuesta por una región cilíndrica, por la cual se efectúa la propagación de la luz (que puede ser de vidrio o de plástico).
Revestimiento	La zona externa y coaxial con el núcleo, totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación, y que se denomina envoltura o revestimiento que es solo de plástico.

En cualquiera de las partes anteriores se deberá cumplir con la diferencia de los índices de refracción(ver figura 1):  $n_1 \neq n_2$  ó  $n_1 > n_2$

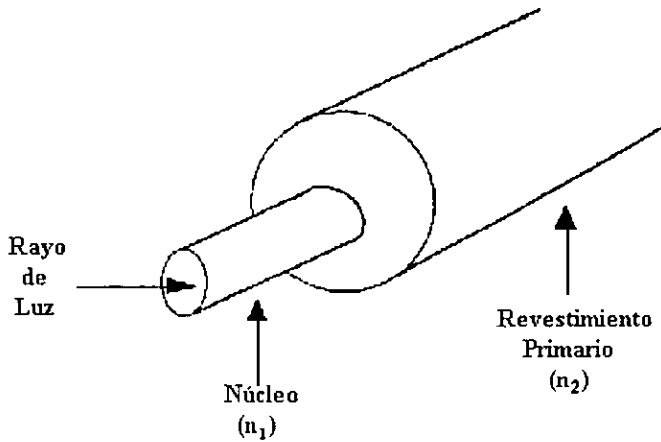


fig. 1 Partes componentes de la fibra óptica

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales:

- a) Del diseño geométrico de la fibra.
- b) De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración.
- c) De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esa anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra óptica.

## Propagación

Las ondas electromagnéticas (por ejemplo Rayos de Luz) viajan en el vacío a la velocidad de la luz, "C", en el aire es casi la misma velocidad, pero en otros medios, tales ondas viajan a menor velocidad ( $V_m$ ). para conocer la diferencia de estas velocidades se introduce el índice de refracción como el cociente  $C/V_m$ .

El índice de refracción (designado con la letra "n",  $\eta$ ) es un número sin unidades y siempre mayor que uno ( $\eta > 1$ ).

Cada material tiene un valor específico del índice de refracción, leves variantes en la composición, como impurezas o dopante, afectan el valor del índice de refracción, alterándose también las propiedades ópticas del material.

En las fibras ópticas ocurre esto, las diferencias entre núcleos y revestimiento están en la segunda y tercera cifra decimales del índice de refracción.

Cuando un rayo de luz choca con una superficie puede ocurrir una reflexión, una refracción o ambos fenómenos. Esto es debido también, a los cambios de índice de refracción. En el caso de reflexión se deberán cumplir algunas condiciones.

- 1) Superficie altamente pulida o reflejante.
- 2) Angulo de incidencia adecuado.

### Reflexión

En la figura 2 mostramos la reflexión a la entrada de una fibra óptica, donde  $\theta_i$  (ángulo de incidencia) es igual a  $\theta_r$  (ángulo de reflexión).

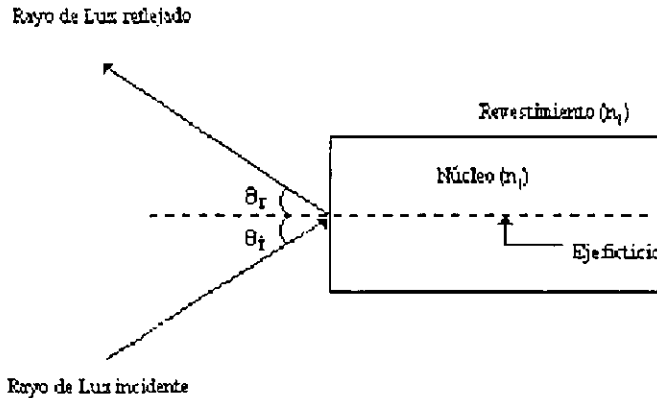


fig. 2 Reflexión a la entrada de la fibra óptica



Como se podrá observar este fenómeno causa que la mayor cantidad de luz sea lanzada fuera del núcleo de la fibra óptica, el cual no es el objetivo.

Los ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal a la superficie de separación de los dos medios son iguales.

### Refracción

Este fenómeno es el más importante desde el punto de vista de entrada de luz al núcleo de la fibra óptica.

En la figura 3 podemos observar que la refracción ayudará a introducir la mayor cantidad de luz al núcleo de la fibra, lográndose esto con ángulos pequeños de los rayos que llegan al núcleo, con respecto al eje ficticio de la fibra óptica.

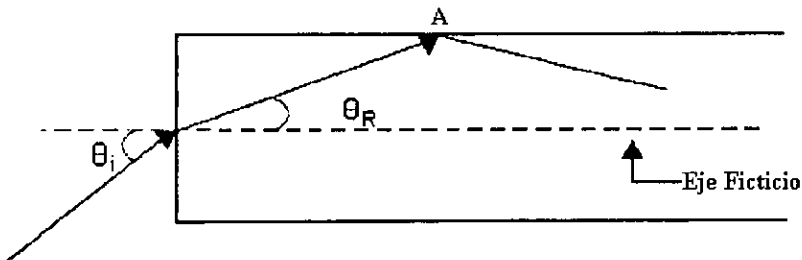


fig. 3 Refracción para introducir la mayor cantidad de luz al núcleo de la fibra

Los ángulos pequeños son fundamentalmente para cumplir con el aspecto geométrico de la luz (rayos de luz), la ley de SNELL y la condición de reflexión total en la frontera del núcleo revestimiento (punto A).

### Ley de SNELL

La ley de SNELL es una relación trigonométrica que nos permite evaluar el ángulo de entrada adecuado, en función de los índices de refracción ( $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ) para lograr la refracción y reflexión total interna del rayo de luz.

Por otra parte si existe un ángulo grande de incidencia, tendremos un rebote total del rayo de luz conocido como reflejancia (R), dado éste por la siguiente expresión.

$$R = \left( \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} \right)^2$$

donde:  $\eta_1$  y  $\eta_0$  son los índices de refracción del aire y de la fibra respectivamente. Existe una condición practica a considerar. R deberá ser menor o igual al 4% del 100% del rayo de luz de entrada (ver figura 4).

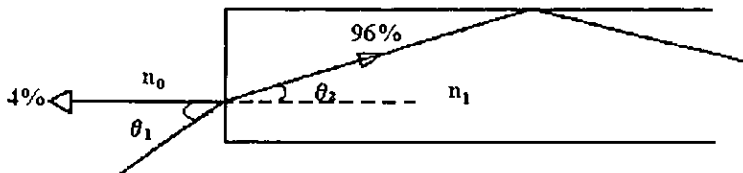


fig. 4 Diagrama

A continuación mostramos la ley de SNELL:

$$\eta_0 \text{ Sen } \theta_1 = \eta_1 \text{ Sen } \theta_2$$

donde:

$\eta_0, \eta_1$ , Son los índices de refracción del aire y núcleo de la fibra, respectivamente.

$\theta_1, \theta_2$ , Son los ángulos de entrada y refracción del rayo, respectivamente.

Sen, es la función trigonométrica tomada con respecto al eje ficticio de la fibra óptica (puede ser también Cos, pero utilizando los ángulos complementarios respectivamente).

El fenómeno de reflexión total (ver figura 5) se repite si el índice de refracción en todo el núcleo de la fibra es el mismo. De este modo el rayo llegará al final de la fibra con el mismo ángulo con el que incidió en ella.

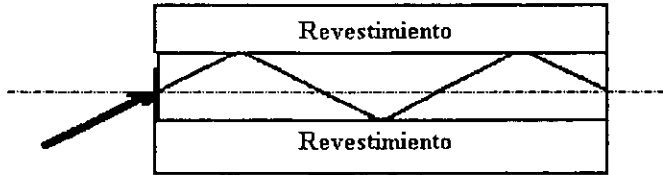


fig. 5 Fenómeno de reflexión total

### Parámetros característicos de las fibras ópticas

En la siguiente tabla se reúne los diversos parámetros que caracterizan a las fibras ópticas.

Parámetros Estáticos	Opticos	Apertura numérica Perfil del índice de refracción.	Son constantes a lo largo de la fibra dentro de las tolerancias propias de fabricación, y se refieren a las características ópticas y geométricas de las mismas.
	Geométricos	Diámetro del núcleo. Diámetro del revestimiento. Excentricidad. No circularidad del núcleo. No circularidad del revestimiento.	
Parámetros Dinámicos	Atenuación	Intrínseca a la fibra. Por causas extrínsecas.	Son características de la fibra que afectan la progresión de la señal a lo largo de la misma.
	Dispersión temporal	Dispersión modal. Dispersión del material. Dispersión por efecto guiasondas.	

### Apertura numérica (AN)

La apertura numérica se considera como un cono de aceptación adecuada a los rayos de luz que llegan al núcleo de la fibra óptica (ver figura 6), determinante de la cantidad de luz que puede aceptar una fibra y, en consecuencia, de la energía que puede transportar.

A continuación mostramos este cono de aceptación de luz y la forma matemática de encontrarla.

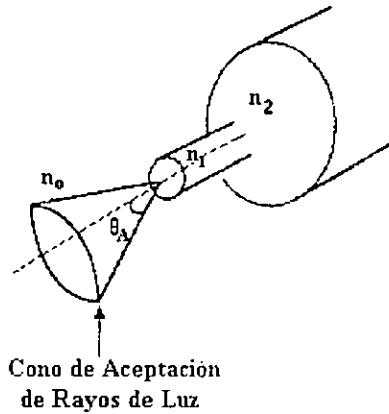


fig. 6 Apertura numérica

$$A.N. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_0 \text{ Sen } \theta_A$$

donde:

A.N = apertura numérica.

$n_0$ ,  $n_1$  y  $n_2$  = son los índices de refracción del aire, del núcleo de la fibra y del recubrimiento respectivamente.

Una A.N. adecuada para nuestros sistemas deberá andar entre 0.5 y 0.1.

### Perfil de índice de refracción

Define la ley de variación del mismo en sentido radial y siendo la velocidad de la luz en cada punto función de dicho índice, dará lugar a diferentes velocidades en diferentes puntos.

### Parámetros geométricos

Son función de la tecnología usada en la fabricación de las fibras, y las tolerancias correspondientes serán una consecuencia de las mismas.

## Atenuación

Se define la pérdida o atenuación en el interior de una fibra como la relación entre las potencias luminosas a la salida y a la entrada, expresada en decibelios y calculada para determinada longitud de onda  $\lambda$ .

$$P(1) \text{ (dB)} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

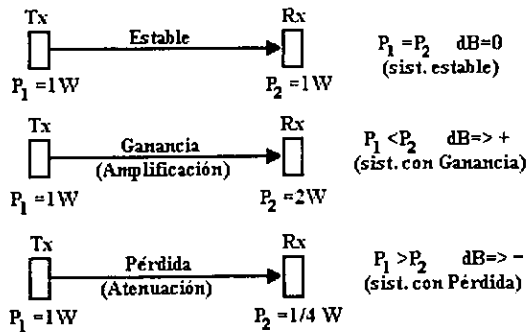
Decibel: Literalmente el decibel significa la décima parte de un bel. Su definición es:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

donde:

$P_1$  y  $P_2$  son las potencias de entrada y salida respectivamente.

Visualicemos con ejemplos y diagrama los tres casos de manifiesto de dB.



Cuando en los dB's aparece un subíndice por ejemplo dBm, este subíndice (m) me indica que la medición, de los dB's, estará referido a una potencia de 1 miliwatt (mW).

$$\text{dBm} = 10 \log \frac{P_2}{1 \text{ mW}} \Rightarrow \text{Potencia de referencia}$$

dBW Pot de referencia = 1 Watt

dB $\mu$  Pot de referencia = 1 microwatt

En caso de utilizar voltajes o corrientes, en lugar de potencia, el factor de 10 cambiará a 20

$$\text{dB} = 20 \log \frac{V_2}{V_1}$$

El coeficiente de atenuación  $\alpha$  ( $\lambda$ ) se define como al atenuación por unidad de longitud, generalmente en Km, a esa longitud de onda:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ (dB / Km)}$$

donde:

$\alpha(\lambda)$  = coeficiente de atenuación.

L = largo de la línea.

$P_1$  y  $P_2$  = potencias de entrada y salida respectivamente.

$V_1$  y  $V_2$  = son los voltajes de entrada y salida respectivamente

En la figura 7 se observa una curva de las pérdidas o atenuación en una fibra óptica, donde se observa:

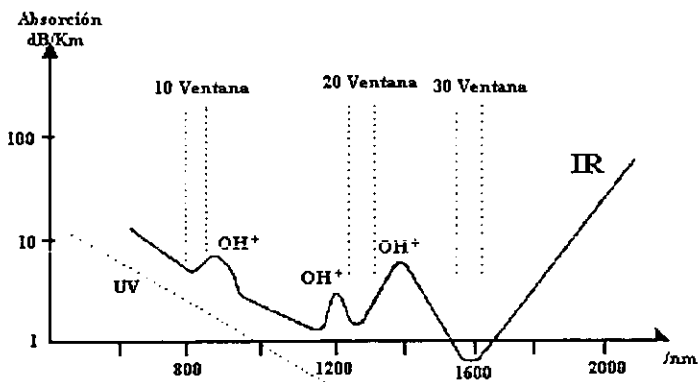


fig. 7 Curva de las pérdidas o atenuación en una fibra óptica

- Una zona por debajo de los 800 nm, que no es conveniente utilizar por ser de alta tensión.
- Una zona por encima de los 1600 nm que presenta problemas de atenuación por efecto de los rayos infrarrojos. A demás, la tecnología de emisores y receptores para esa longitud de onda es muy reciente.
- Tres zonas de mínima atenuación, denominadas ventanas, que determinen la longitudes de onda habituales a trabajar. Los primeros sistemas trabajaron en la primera ventana (850 nm). Actualmente la zona de trabajo más habitual es 1300 nm. la tendencia actual es la utilización de los láseres en la tercera ventana, entorno a los 1550 nm.

## Dispersión Temporal

Es causada por las características dispersivas de la fibra sobre la señal en el transcurso del tiempo, lo que provoca ensanchamiento en el tiempo de los impulsos a medida que progresan en su recorrido y, en consecuencia, deformación de los mismos. acarreando errores que, en definitiva, son los que limitan la calidad de información.

El fenómeno global de dispersión se debe a tres factores:

$$\sigma^2 = \sigma_m^2 + (\sigma_e + \sigma_f)^2$$

- 1) Dispersión modal  $\sigma_m$ : Se origina debido a que cada uno de los modos que se propagan por el guía de ondas puede seguir una trayectoria distinta en el interior del núcleo. Como además la velocidad de la luz en cada punto depende del índice de refracción, los modos de propagación sufren retardos relativos o que dan lugar a un ensanchamiento temporal de los impulsos de luz.
- 2) Dispersión del material  $\sigma_e$ : Es causada por el ancho del espectro de la fuente de luz, por lo cual se denomina espectral, al propagar todas las líneas espectrales correspondientes a las longitudes de onda de la fuente de luz, estas viajan a diferentes velocidades de propagación lo que origina un ensanchamiento en los pulsos.
- 3) Dispersión por efecto guiasonda  $\sigma_f$ : Esta dispersión es debida a los parámetros ópticos y geométricos de la fibra.

Las dos primeras son inherentes a las fibras multimodo, pero, atendiendo a su diferente naturaleza, han de sumarse cuadráticamente. Por el contrario, las dispersiones de materia y de guiasonda se refieren a cada modo, por lo que se suman de modo lineal. Esta suma es llamada **Dispersión Cromática**.

En la figura 8 se muestra una gráfica donde se observa el comportamiento de la dispersión del material.

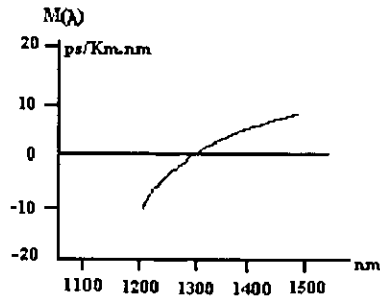


fig. 8 Gráfica donde se observa el comportamiento de la dispersión del material

### Optimización de las características de transmisión

Hemos visto que, por una parte, las atenuaciones mínimas se producen, salvo picos provocados por los iones  $\text{OH}^-$  en longitudes de onda que van de 1200 a 1600 nm, por otro lado, para longitudes de onda próximas a 1300 nm, la dispersión cromática es mínima.

Todo ello sugiere la posibilidad de optimizar la transmisión uniendo en una misma longitud de onda la mínima atenuación y la mínima dispersión temporal. Ello se consigue de dos modos posibles:

- a) Desplazando el punto de mínima dispersión hacia el de mínima atenuación (Técnica de dispersión corrida) y cuyos puntos de trabajo se sitúan en la tercera ventana (1550 nm). Ello se consigue en base de alterar el perfil de índice del núcleo y las condiciones de dopado del mismo.
- b) Diseñando la fibra de modo que su curva de dispersión sea lo más plana posible y casi nula en la región de mínima atenuación, (Técnica de dispersión aplanada). Actualmente esta técnica es de un costo muy alto.

En la figura 9 se muestra la dispersión como una función de longitud de onda de base a lo anterior.



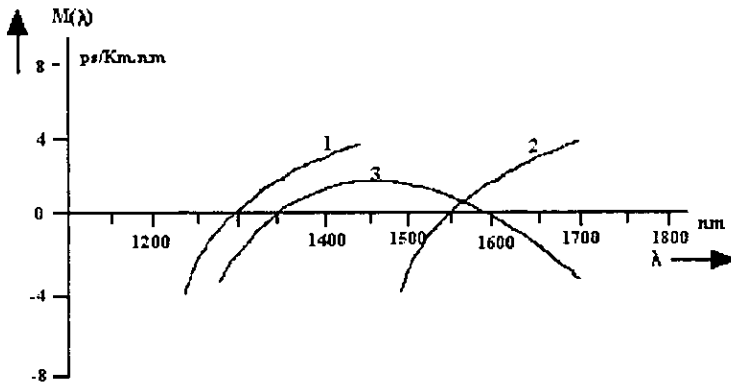


fig. 9 Dispersión como una función de longitud de onda

- 1) Dispersión normal.
- 2) Técnica de dispersión corrida.
- 3) Técnica de dispersión aplanada.

Los valores promedio máximo para una fibra de dispersión natural son de aproximadamente 3.5 ps/Km.nm a 1310 nm, y de 19 ps/Km.nm a 1550 nm. Como se observa en las figuras, la fibra de dispersión corrida presenta a 1550 nm una óptima de atenuación como de dispersión.

## Tipos de fibra óptica

Tipos de fibra óptica en función de su perfil y cantidad de rayos luminosos (modos) dentro de su núcleo ( figura 10).

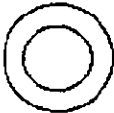






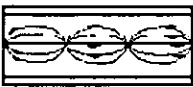


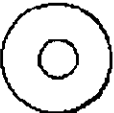
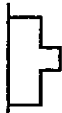
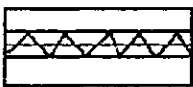




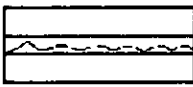


<p>Sección transversal Índice Escalonada</p>  <p>Perfil del índice</p> 	<p>Trayectoria del Haz</p>  <p>Pulso de entrada</p>  <p>Pulso de salida</p> 	<p>Aplicación</p> <p>C.D. &lt;5 Km.</p>
<p>Índice Gradual</p>  <p>Perfil del índice</p> 	<p>Trayectoria del Haz</p>  <p>Pulso de entrada</p>  <p>Pulso de salida</p> 	<p>M.D. 5.15 Km.</p>
<p>Monomodo Dispersión Normal</p>  <p>Perfil del índice</p> 	<p>Trayectoria del Haz</p>  <p>Pulso de entrada</p>  <p>Pulso de salida</p> 	<p>L.D. &lt;70 Km</p>
<p>Monomodo Dispersión Corrida</p>  <p>Perfil del índice</p> 	<p>Trayectoria del Haz</p>  <p>Pulso de entrada</p>  <p>Pulso de salida</p> 	<p>L.D. &lt;120 Km.</p>

fig. 10 Tipos de fibra óptica

### Cap. 3 Elementos de un sistema de transmisión por fibra óptica

La figura 11, muestra el diagrama a bloques básico de un sistema de transmisión con fibra óptica.

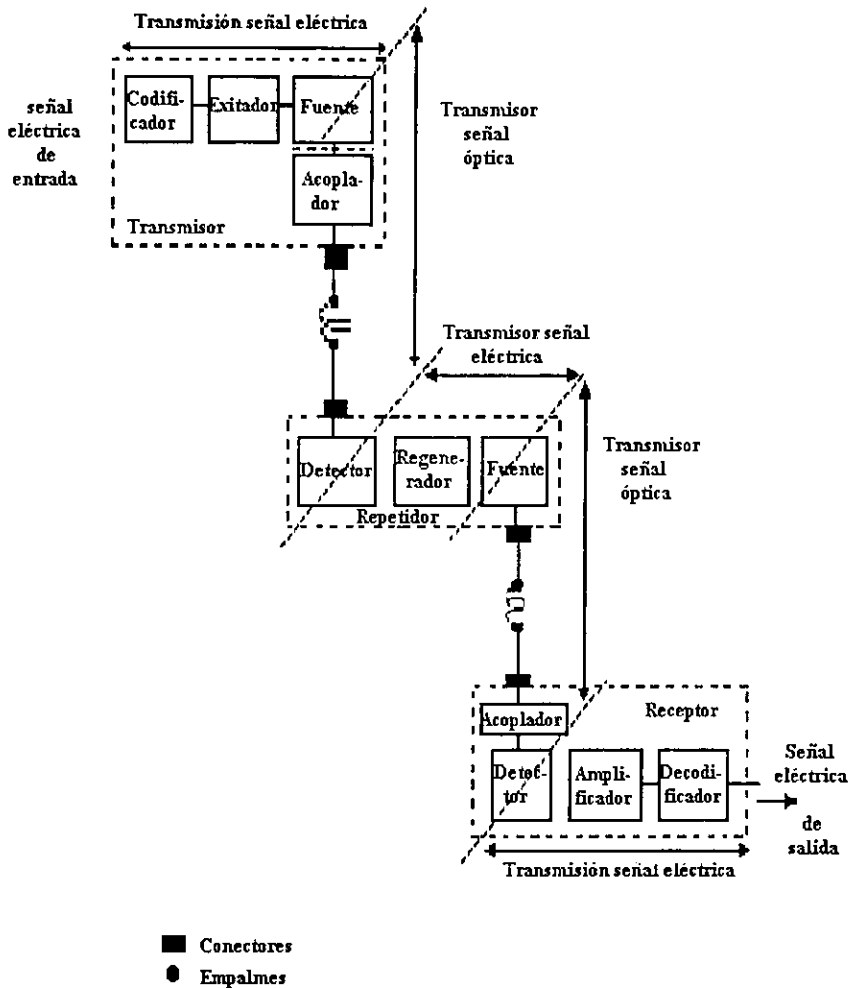


fig. 11 Diagrama de bloques de un sistema de transmisión con fibra óptica

## Descripción

El elemento básico de un sistema de transmisión por fibra óptica es el equipo de línea con los equipos terminales de línea (OLTE) al comienzo y al final de la transmisión óptica y, en el caso de que distancias prolongadas lo hagan necesario, los regeneradores intermedios.

Las descripción de cada uno de los elementos que constituyen un sistema de transmisión con fibra óptica, es mencionada en la siguiente tabla.

Elemento	Descripción
Codificador	En transmisión digital, detecta los datos de información, los regenera y ordena en el tiempo con símbolos apropiados para el circuito de la fuente.
Excitador	Modula la corriente que fluye a través de la fuente para producir la señal óptica deseada.
Fuente	Provee la onda portadora por medio de la conversión electro-óptica (E/O).
Modulador	Coloca la información sobre la portadora (si la fuente no puede ser modulada directamente por el circuito excitador).
Optica de transmisión (Acoplador)	Acopla la luz modulada en el canal de información.
Canal de información (Fibra óptica)	Es el medio que transmite la señal óptica del transmisor-receptor.
Repetidor	Aumenta la amplitud y corrige la forma de la señal que se ha deformado durante la transmisión, solo se usará en enlaces que los 70 Kms.
Optica receptora (Acoplador)	Acopla la luz del canal de información en el detector.
Detector	Convierte la señal óptica en una señal eléctrica (conversor opto-eléctrico O/E)
Procesamiento de la señal	Filtros, amplificadores, ecualizadores, decodificadores, etc. que convierten la señal eléctrica del detector en una forma apropiada para su uso.

## Tipos de cables ópticos

Los cables ópticos se dividen por su uso en 3 grandes grupos:

- Cables para interiores.
- Cables para exteriores.
- Cables especiales.

## Cables para interiores

Los cables para interiores (ver figura 12) son los que se usan dentro de los edificios, o de la llamada planta interna, estos cables en general deben tener buena flexibilidad y ser no propagadores de la flama. Estos cables pueden contener elementos metálicos o bien ser totalmente dieléctricos, pueden contener una o más fibras, si contienen una fibra (monofibra) por lo regular su construcción es la siguiente:

La fibra lleva protección secundaria de tubo apretado, alrededor de ella lleva un miembro de tensión externo de Aramida, sobre ella lleva una cinta mylar como barrera térmica y sobre esta va la cubierta externa de PVC antifuego. En la siguiente figura se muestran las partes físicas de que conforman un cable de fibra óptica para este uso.

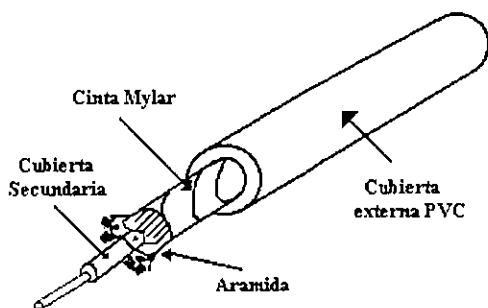


fig. 12 Partes físicas de los cables para interiores (monofibra)

Cuando lleva dos fibras (dúplex) su construcción es la de dos cables monofibra unidos por medio de una lengüeta en la cubierta externa (ver figura 13).

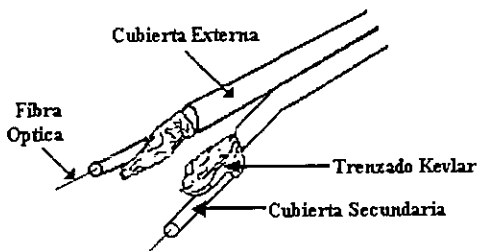


fig. 13 Partes físicas de los cables para interiores (dúplex)

En los cables multifibra se da una infinidad de diseños caracterizándose todos ellos en tener la cubierta externa de PVC antifuego, y en no llevar armaduras.

## Cables para exteriores

Los cables exteriores se emplean en la llamada planta externa, aquí existen una gran variedad de diseños caracterizándose todos ellos en contener siempre más de dos fibras (ver figura 14).

En estos diseños contemplan todas las posibles variedades, es decir:

- Puede llevar cubierta secundaria de tubo holgado o de tubo apretado, o bien ir sin esta cubierta.
- Pueden ser de elemento central de tensión de núcleo ranurado, o de elemento de extensión exterior.
- Por lo regular todos llevan barreras contra la humedad que pueden ser de jelly, de cintas metálicas. o utilizar presión de gas. En general la cubierta externa es de polietileno con negro de humo.
- Pueden llevar o no armadura y si la llevan pueden ser en cualquiera de sus variedades.

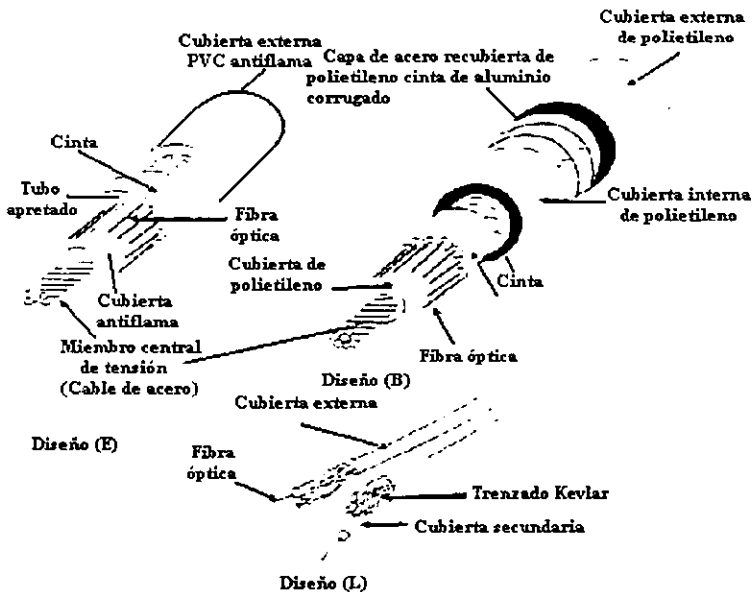


fig. 14 Cables para exteriores

## Características de las fibras ópticas según su fabricación

En número de fibras ópticas por tubo holgado dependerá de la capacidad de fibras del cable, de acuerdo a las siguientes tablas.

El cable de fibras ópticas directamente enterrado se emplea en las redes sin canalización como cable de enlace entre centrales, principalmente suburbanas; en casos donde no pueda construirse una canalización normalizada o está no sea justificada a partir de un análisis técnico económico. En zonas rurales para enlazar equipos U.R.AO a U.R.L'S.

### Cables de fibras ópticas Dispersión Normal

Estos cables tienen las características señaladas en la siguiente tabla:

Identificación TELMEX	Características principales	Nº de fibras
TM1	- Núcleo de tracción metálico	6
	o no metálico	12
	- Armadura sencilla	18
	- Fibra óptica de dispersión normal	24
		36
		72
TM4	- Núcleo de tracción no metálico	6
	Refuerzo de fibra Aramida	12
		18
	- Con doble armadura	24
	- Fibra óptica Dispersión Normal	36
		72

Cables de fibra óptica Dispersión Normal

## Cables de fibras ópticas Dispersión Corrida

Estos cables tienen las siguientes características:

Identificación TELMEX	Características principales	N° de fibras
TM7	- Núcleo de Tracción no metálico	6
		12
	- Armadura sencilla	18
	- Fibra óptica de Dispersión Corrida	24
		36
		72
TM8	- Núcleo de Tracción no metálicos	6
		12
	Refuerza de fibra Aramida	18
	- Con doble armadura	24
	- Fibra óptica Dispersión Corrida	36
		72

Tabla 1 Cables de fibra óptica Dispersión Corrida

### Características de las fibras ópticas

Las fibras ópticas a utilizar en estos enlaces son de dos tipos:

- a) fibra óptica unimodo dispersión normal.
- b) Fibra óptica unimodo dispersión corrida.

a) La **fibra óptica unimodo dispersión normal** utilizada por TELMEX tiene las características señaladas a continuación:

Atenuación	< 0.4 dB/Km @ 1300-1310 nm < 0.3 dB/Km @ 1550 nm
Longitud de onda de corte de fibra	$1190 \text{ nm} < \lambda_c < 1300 \text{ nm}$
Diámetro del modo propagación	$9.30 \pm 0.5 \mu\text{m} @ 1300 \text{ nm}$
Longitud de onda de dispersión cero	$1301.5 \text{ nm} < \lambda_0 < 1321.5 \text{ nm}$
Diámetro del núcleo	8.3 $\mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	$125.0 \pm 2.0 \mu\text{m}$
No circularidad del revestimiento	< 2%
Diámetro de protección primaria	$250 \pm 15 \mu\text{m}$
Concentricidad de la protección primaria	> 0.70
Índice de refracción	1.470 @ 1300 nm

Tabla 2 Características de la fibra óptica unimodo dispersión modal



b) La fibra óptica unimodo dispersión corrida utilizada por TELMEX tiene las siguientes características:

Atenuación	$\leq 0.4 \text{ dB/Km @ } 1500 \text{ nm}$
Longitud de onda de corte de la fibra	$1200 \text{ nm} \pm 100 \text{ nm}$
Diámetro del modo de propagación	$810 \pm 0.65 \mu\text{m @ } 1500 \text{ nm}$
Longitud de onda de dispersión cero	$\leq 2.7 \text{ ps/(nm.Km)}$ rango de 1525 a 1575 nm
Diámetro del revestimiento	$125.0 \pm 2 \mu\text{m}$
No circularidad del revestimiento	$< 2\%$
Diámetro de protección primaria	$250 \pm 15 \mu\text{m}$
Concentricidad de la protección primaria	$\geq 0.70$

**Tabla 3** Características de la fibra óptica unimodo dispersión corrida

**Tabla de características de cables de fibra óptica**

Los cables a utilizar en enlaces con fibras ópticas son de dos tipos.

a) **Dispersión normal:** lo forman los cables tipo TM1 y TM4 y sus características se describen en la siguientes tablas:

Número de fibras	Numero de fibras por tubo	Diámetro del cable (mm)	Peso aprox. (Kg./Km)
6	6 fibras/tubo y 3 de relleno	13.2	170
12	2 fibras/tubo	13.2	170
18	3 fibras/tubo y 3 de relleno	14.9	220
24	4 fibras/tubo	14.9	220
36	6 fibras/tubo	14.9	220
72	12 fibras/tubo	17.7	330

**Tabla 1** Características de cables de fibra óptica tipo TM1

Número de fibras	Número de fibras por tubo	Diámetro del cable (mm)	Peso aprox. (Kg./Km)
6	2 fibra/tubo y 3 de relleno 6 fibras/tubo y 5 de relleno	16.2	290
12	2 fibras/tubo	16.2	290
18	6 fibras/tubo y 3 de relleno	17.3	310
24	4 fibras/tubo	17.3	310
36	6 fibras/tubo	17.3	310
72	12 fibras/tubo	17.3	310

**Tabla 2** Características de cables de fibra óptica tipo TM4

b) **Dispersión corrida:** lo forman los cables tipo TM7 y TM8 y sus características son las descritas en las siguientes tablas:

Número de fibras	Número de fibras por tubo	Diámetro del cable (mm)	Peso aprox. (Kg./Km)	Longitud del cable en carrete (m)
6	2 fibras/tubo y 3 de relleno 6 fibras/tubo y 5 de relleno	11.5	250	4.200
12	2 fibras/tubo	13.0	270	4.200
18	6 fibras/tubo y 3 de relleno	13.0	270	4.200
24	4 fibras/tubo	13.0	270	4.200
36	6 fibras/tubo	13.0	270	4.200
72	12 fibras/tubo	13.0	270	4.200

**Tabla 3** Características de cables de fibra óptica tipo TM7

Número de fibras	Número de fibras por tubo	Diámetro del cable (mm)	Peso aprox. (Kg./Km)	Longitud del cable en carrete (m)
6	2 fibras/tubo y 3 de relleno	13.5	330	4.200
12	2 fibras/tubo	16.5	350	4.200
18	6 fibras/tubo y 3 de relleno	18.0	370	4.200
24	4 fibras/tubo	18.0	370	4.200
36	6 fibras/tubo	18.0	370	4.200
72	12 fibras/tubo	18.0	370	4.200

**Tabla 4** Características de cables de fibra óptica tipo TM8

### Tipos de empalmes

En la actualidad hay dos técnicas de empalmes de fibras ópticas:

- 1) Empalmes de fusión por arco eléctrico.
- 2) Empalmes sobre sustrato ranurado (Mecánico)

En la figura 15 se muestra en forma sencilla los dos tipos de técnica de empalme.

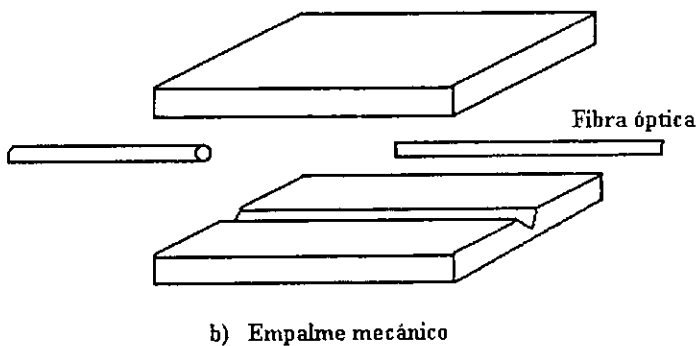
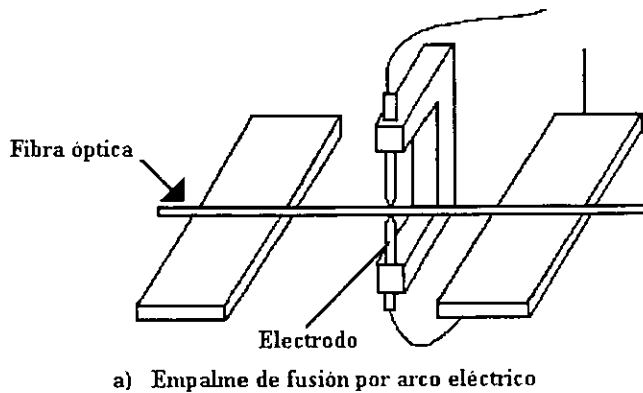


fig. 15

En aplicaciones que requieren pérdidas bajas, como: redes telefónicas donde las pérdidas en las uniones reducen la distancia admisible entre repetidores e instalaciones permanentes de cables de fibra en que las uniones no necesitan desmontarse, las fibras necesitan estar empalmadas. Las pérdidas conseguidas en los empalmes suelen ser del orden de unas décimas de decibelios. Existen diferentes técnicas de empalme, incluyendo las basadas en adhesivos y las de fusión por llama de gas o por arco eléctrico. Actualmente la técnica más usada es la de fusión por arco eléctrico.

## Empalmes mecánicos

Cuando se detienen enlaces de corta distancia donde se pueden tolerar pérdidas considerables, se utilizan empalmes mecánicos en los cuales las fibras son unidas a través de medios mecánicos, como ranuras en forma de "V", varillas (de acero o vidrio) o esferas.

### Método de varillas

Este es uno de los primeros métodos utilizados de empalmes mecánicos. Por lo general se utilizan tres varillas de acero o vidrio (o pins) acomodados (ver figura 16) para que en el orificio central queden alineadas las fibras a unir.

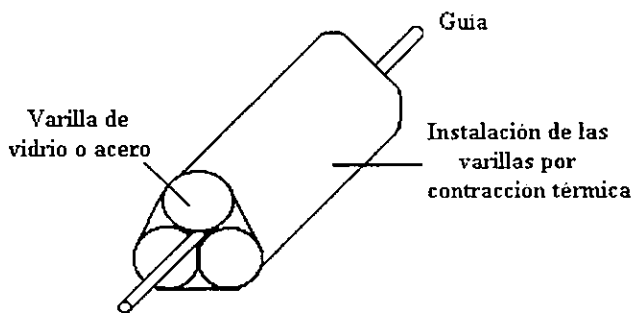


fig. 16 Método mecánico utilizando tres varillas

Se puede agregar una sustancia epóxica para adherir las fibras y además actuar como acoplador óptico.

Las varillas son de un diámetro mucho mayor que el de la fibra y deben tener dimensiones muy precisas con tolerancias menores a  $0.04 \mu\text{m}$ .

Se tienen otros tipos de empalmes utilizando cuatro y seis varillas, con lo cual se tienen más puntos de alineamiento y menor volumen en el empalme (ver figura 17).

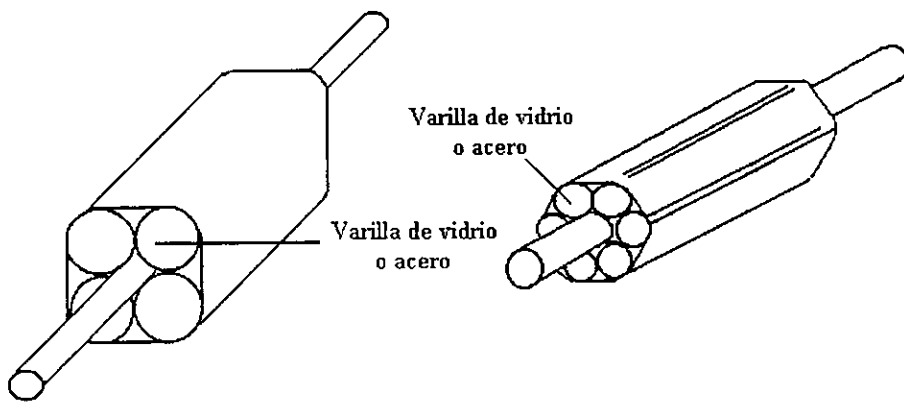


fig. 17 Método utilizando cuatro y seis varillas

### Método de ranura en V

El método más usado de empalme mecánico es el de ranura en V (V-Groove), en el que las fibras ya cortadas y preparadas se colocan en ambos extremos de una ranura acanalada en forma de V, que alinea las fibras para la unión, y se agrega un adhesivo con un índice de refracción igual al del núcleo de la fibra.

La unión se logra mediante una tapa que sujete las fibras, manteniéndolas en contacto. El material acanalado puede ser silicón, material cerámico, acero o aluminio.

Las fibras se unen en la mitad del canal y se ponen en contacto con la ayuda de bloques móviles: supervisando la unión ya sea a simple vista o con una lupa.

Existen diferentes tipos de empalmes con el método de ranura en "V", el más sencillo utiliza una tapa plana, como la mostrada en la figura 18 a). También puede utilizarse una tapa con otra ranura en "V" como se ve en la figura 18 b) e inclusive existe un diseño con 3 secciones ranuradas (ver las figura 18 c) y d)), éstas ofrecen una alineación de la fibra en forma más precisa, con la desventaja que requieren de precisión lo cual, eleva su costo.

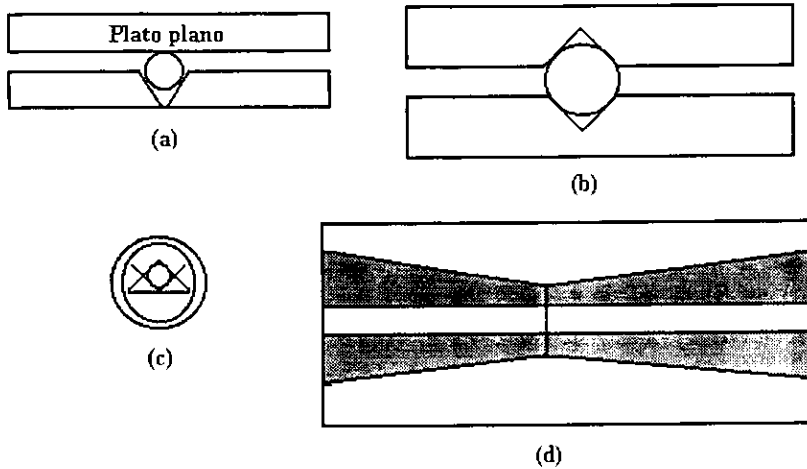


fig. 18 Métodos de ranuras en V

En este método se tiene la limitación de unir solo fibras con diámetros de revestimiento iguales con una alta concentricidad.

Las ventajas del método son: su facilidad y rapidez de elaboración. La pérdida por empalme es de hasta 1 dB.

### Método elastomérico

Otro método de empalme es el elastomérico, que consiste en dos tubos de materiales elásticos con un pequeño orificio en el centro y de diámetro ligeramente menor que el del revestimiento de la fibra, con un ensanchamiento en ambos extremos del orificio para facilitar la inserción de la fibra. Cuando se efectúa la inserción, el diámetro del orificio se expande de tal forma, que el material elástico ejerce una fuerza simétrica sobre la fibra. Esta pureza hace que los ejes de las fibras a unir, queden automáticamente alineadas sin importar si son de diferente diámetro. Además, con ello se eliminan las fallas angulares y radiales reduciendo las pérdidas en el empalme (ver la figura 19).

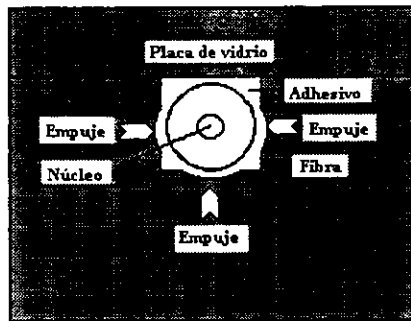


fig. 19 Método elastomérico

### Otros métodos

Existen distintos elementos mecánicos que actúan para alinear las fibras al unir.

El más sencillo es el empalme por tubo en donde se tiene una pieza de vidrio u otro material, con un orificio en forma de tubo y con un diámetro ligeramente mayor al de la fibra a unir, incluyendo un orificio lateral para el adhesivo.

Se tiene el inconveniente que es difícil introducir la fibra en un orificio tan pequeño y además la pieza, debe tener gran precisión en su construcción para evitar un desalineamiento en la unión (ver figura 20).

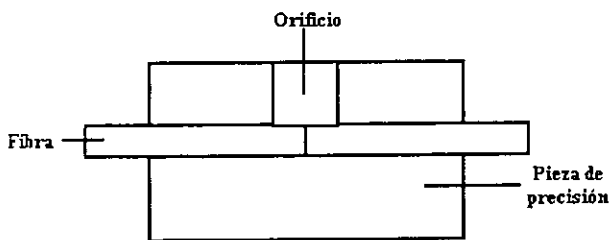


fig. 20 Método de empalme por tubo

Una variación de este método es el empalme crimpado (ver figura 21). En este método el tubo tiene un diámetro mayor y es menor elaborada su construcción. Se tiene una herramienta especializada que comprime en forma precisa al tubo para que queden alineadas las fibras.

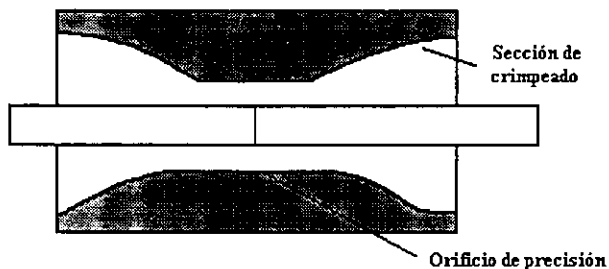


fig. 21 Método de empalme crimpado

Otra variación al método del tubo, es aquel que utiliza un tubo con dobleces de  $15^\circ$  en sus extremos como se muestra en la figura 22. La construcción puede hacerse con 4 pequeñas varillas de vidrio. Los dobleces obligan a la fibra a apoyarse en la ranura que forman dos de las varillas quedando así alineadas.

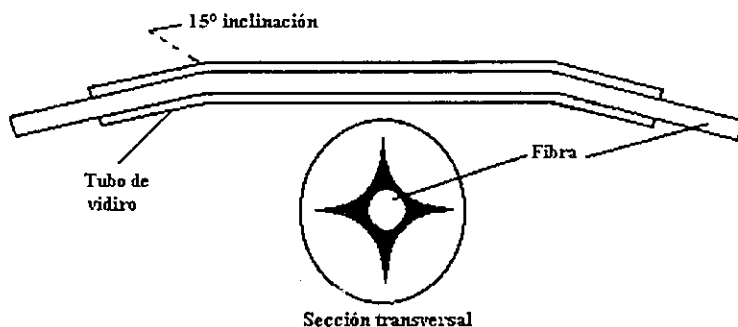


fig. 22 Método del tubo, utilizando tubo con dobleces de  $15^\circ$

También existen empalmes mecánicos que se basan en esferas macizas de fina construcción, entre los cuales se alinean las fibras al unir.

Por otra parte se han desarrollado empalmes multifibra para satisfacer la aparición de cables multifibra en forma de listón. En un principio se basan en los empalmes de ranura en "V" como se muestra en la figura 23.



En la mayoría de los empalmes que utilizan adhesivo debe curarse este con luz ultravioleta en ambientes limpios.

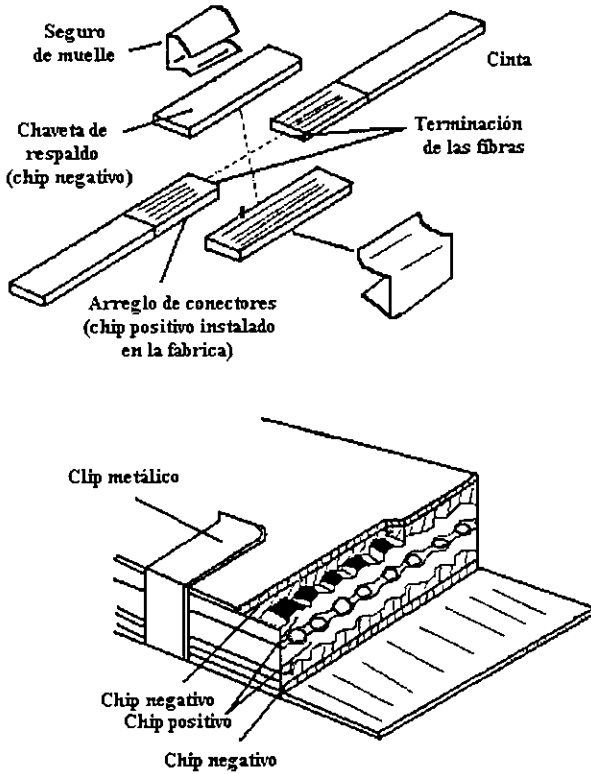


fig. 23 Empalmes multifibra

### Empalmes por fusión

El empalme por fusión es el método más utilizado y consiste en aplicar calor en una zona específica entre las fibras a unir, suavizándolas y fusionándolas. Las fibras deben prepararse precisamente en sus extremos quitándoles las cubiertas secundaria y primaria, cortando las caras de los extremos para que estén planas y perpendiculares al eje limpiando la fibra de grasa y polvo. A continuación la fibra se monta ya sea en una base ranurado o en sujetadores controlados por microposicionadores accionados por motores o manualmente, con la libertad de poder moverse en las tres direcciones para obtener un alineamiento óptimo, supervisado mediante un microscopio. Ver la figura 24 a, b y c.

Cuando los extremos de las fibras presentan imperfecciones pueden generarse burbujas de aire y deformaciones del núcleo durante la elaboración del empalme. Para evitarlo, se hace una prefusión, la cual consiste en aplicar calor durante un lapso muy pequeño, mucho menor que la fusión, con la que se redondean los extremos suavizando su superficie, evitando con esto las imperfecciones mostradas en la figura 24.

Para aplicar calor a la unión, se utiliza principalmente un arco eléctrico aunque también se tiene fusión por gas o por láser. Para evitar movimientos indeseables de la fibra, ésta es sujeta por un sistema de bloques móviles o por sujetadores mecánicos.

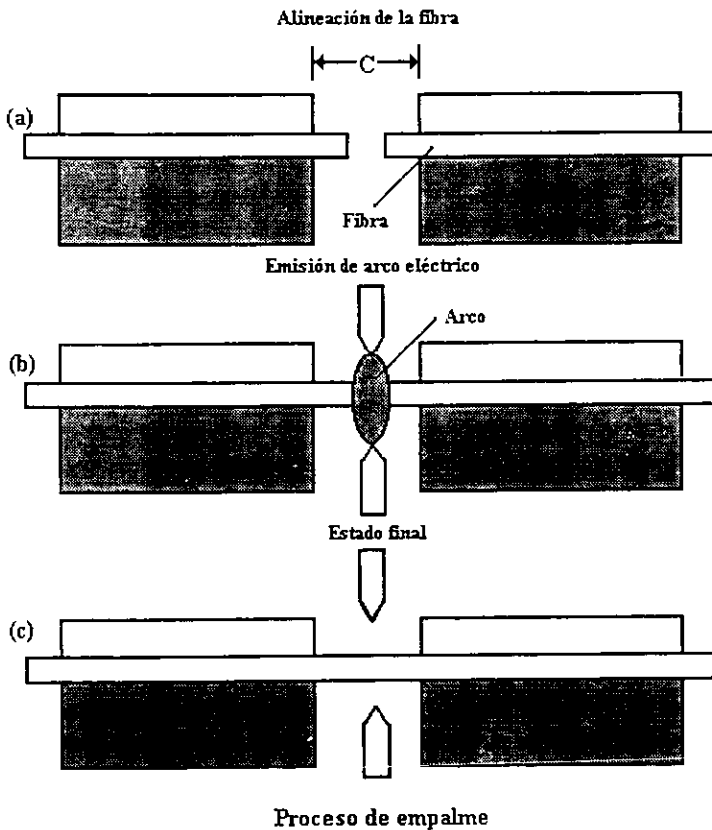


fig. 24 Empalmes por fusión

El tiempo de fusión y el calor aplicado deben estar cuidadosamente controlados para obtener un empalme eficiente. Para la optimización de este método, se alimenta luz en un extremo de una de las fibras a empalmar y en la otra fibra se recoge la luz de la misma forma. Midiéndola y observándose que en donde la potencia óptica recibida sea mayor, se tendrá la alineación óptica de las fibras (ver figura 25).



**Empalme angosto por exceso de distancia entre los extremos**



**Empalme redondo por exceso de arco y/o alimentación de fibra**

**fig. 25 Empalmes por fusión**

Este procedimiento puede efectuarse automáticamente sin intervención del operador. Mediante métodos de fusión se logran atenuaciones por empalme entre 0.2 0.1 dB llegando a tener inclusive menos de 0.01 dB para fibras idénticas.

Una vez hecho el empalme por fusión se debe proteger con una cubierta que sustituya las cubiertas primaria y secundaria de la fibra y además almacenarse de tal forma que no reciba esfuerzos de tensión, ya que la combinación de daños superficiales por manejo de fibra, crecimiento de grietas por calentamiento y esfuerzos residuales por cambio de la composición química, disminuyen considerablemente la resistencia mecánica del punto de unión de las fibras.

### **Tipos de conectores**

Cuando se requiere unir dos fibras ópticas en forma rápida y temporal, se utilizan los conectores. Estos, en base a sus principios de diseño, se pueden dividir en dos tipos de conectores: de acercamiento mecánico de precisión de los extremos de la fibra y de acercamiento óptico de los frentes de onda de las fibras a unir.

En el primer caso, se utilizan estructuras que requieren de precisión lateral, de azimutal, y longitudinal para lograr el alineamiento requerido de la fibra.

En el segundo caso se utilizan lentes para ayudar en el alineamiento de las dos fibras a unir, logrando mejores tolerancias angulares.

Los conectores más utilizados son los de primer tipo, y en él se encuentran muchas variedades que combinan costos, pérdidas ópticas, durabilidad, etc. Las variedades más comunes según la estructura del conector son:

Conector de Férula o Casquillo.

Conectores Bicónicos.

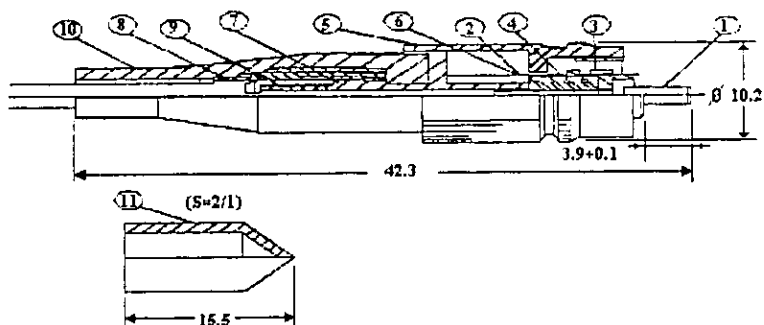
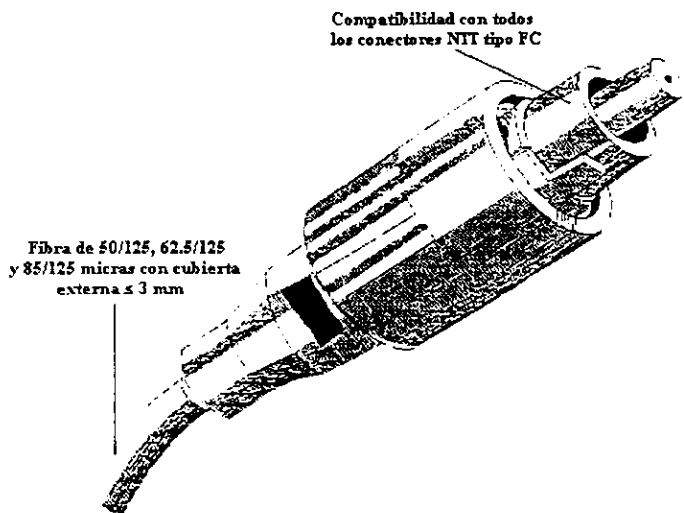
Conectores de Excentricidad Ajustable

### **Conectores de férula o casquillo**

En estos conectores, la fibra óptica se coloca dentro de un casquillo protector de presión. En la unión se deben alinear los casquillos y cuidar que los extremos del conector estén pulidos.

Se debe mantener la concentricidad entre la fibra y el casquillo, ya que de ello dependen las pérdidas en el conector. Existe una gran variedad de estos conectores siendo los más representativos los siguientes:

- 1) El conector FC, en donde la fibra es descansada en un casquillo que contiene en su interior una capilaridad concéntrica encargada del centrado y fijación de la fibra. Al montar la fibra al conector, la fibra es preparada con resina epóxica en la cavidad del casquillo para lograr la fijación adecuada de la fibra. El casquillo es de cerámica por lo general cubierta de acero (ver figura 26).



- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| 1.- Férula            | 7.- Cuerpo frontal   |
| 2.- Marco de conexión | 8.- Cuerpo posterior |
| 3.- Cuña              | 9.- Divisor interior |
| 4.- Pivote            | 10.- Cubierta        |
| 5.- Tuerca            | 11.- Tapa            |
| 6.- Resorte           |                      |

fig. 26 Conector FC

Requiere de un pulido en equipo automatizado. Tiene pérdidas entre 1 y 0.6 dB para fibras monomodo. Se pueden lograr menores pérdidas mejorando la técnica de pulido presentando una superficie más plana. Es altamente durable (1 000 inserciones).

El modelo FC-PC (Physical Contact), presenta en la punta del casquillo, en lugar de una superficie plana, una superficie esférica de un radio aproximado de 60 mm. para que las fibras estén en un real contacto físico en la unión. Este factor reduce las reflexiones y las pérdidas llegando a tener menos de 0.5 dB por conector. Se utiliza en transmisión de voz y datos en alta velocidad, tiene alta durabilidad (ver figura 27).

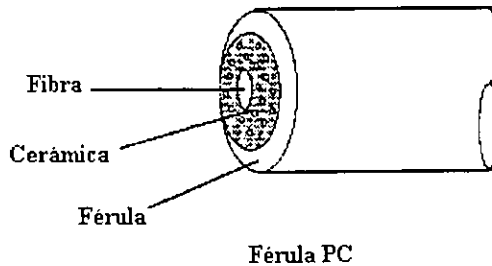


fig. 27

- 2) El tipo SMA (Subminiatura-A), es un conector muy utilizado en equipo de transmisión de datos. Como su nombre lo indica, tiene un tamaño muy pequeño, además de buena durabilidad y amplia disponibilidad en el mercado. Es uno de los conectores más fáciles de ensamblar, ya que requiere de un mínimo de herramientas y habilidad. Sus pérdidas no son tan bajas como FC-PC y se encuentran entre 0.7 y 2 dB. Además, se puede tener la cubierta externa del conector en distintos materiales dependiendo de la aplicación, pudiendo ser de acero, bronce niquelado o plástico (ver figura 28).

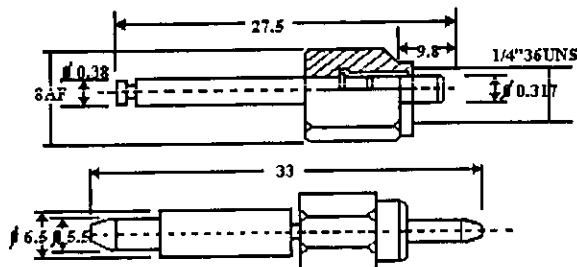


fig. 28 Conector tipo SMA

- 3) El conector D4 es similar al FC e inclusive tiene la versión D4-PC. Tiene pérdidas aproximadas de 0.7 dB y una durabilidad de 1 000 inserciones. Se utiliza en equipo de telecomunicaciones (ver figura 29).

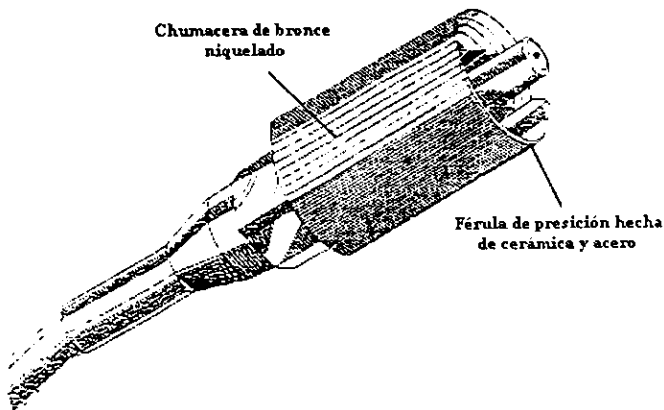


fig. 29 Conector D4

### Conectores Bicónicos

Esta tecnología es ampliamente utilizada en fibras multimodo para telecomunicación en transmisión de datos. Consiste en dos conos concéntricos que se encargan de alinear la fibra en el casquillo. Se obtienen pérdidas menores de 1 dB. El casquillo es de cerámica encapsulado en metal y la cubierta es de cuarzo combinado con metal epóxico. Incluye un resorte para ajustar el punto de contacto (ver figura 30).

Diseño biconico para  
alineación de precisión

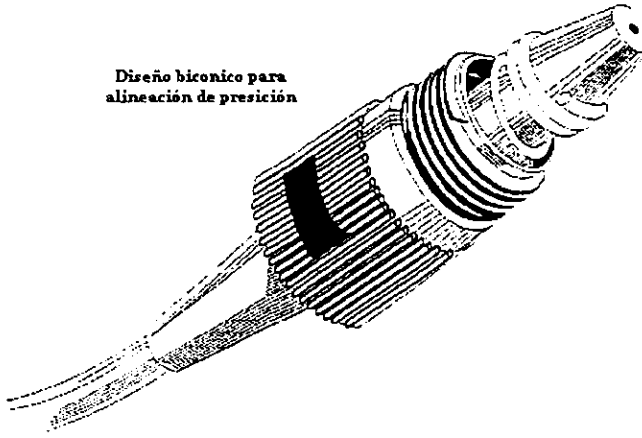


fig. 30 Conector bicónico

### Conectores de Excentricidad Ajustable

En estos conectores se logra un alineamiento transversal preciso al rotar una fibra con respecto a la otra, estando ambas fijas excéntricamente montadas. El alimento óptico se logra cuando la señal monitoreada a través del conector es máxima. En estos casos se tienen pérdidas menores de 0.5 dB en fibras monomodo. Una vez hecho el ajuste del conector para la fibra montada, se fija para que no sea alterada, aunque haya la necesidad de hacer nuevamente un ajuste, la mayor complejidad del conector y su mayor costo son desventajas. La precisión lograda mediante este método es única (ver figura 31).

Como ejemplo de este tipo de conectores el fabricado por DIAMOND, el cual debe ajustarse el centrado de la fibra con un microscopio. Además contiene un casquillo que puede rotar 30° con respecto a todo el conector.

Otra variedad son los conectores RADIAL con tecnología OPTABALL, consiste en dos alineamientos, uno el de la fibra en el casquillo, donde se ajusta radialmente la fibra auxiliándose en el patrón de luz emitida por el conector al ser alimentado por una potente luz blanca.

El ajuste se hace mediante 4 tornillos radiales diferentes con auxilio de una herramienta especializada; el segundo alineamiento se lleva a cabo entre los casquillos a unir, estos son insertados en una esfera con un orificio, asegurando así que los ejes axiales de ambos casquillos y ambas fibras coinciden.



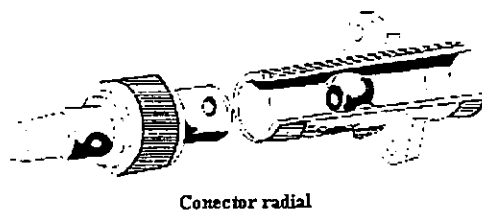
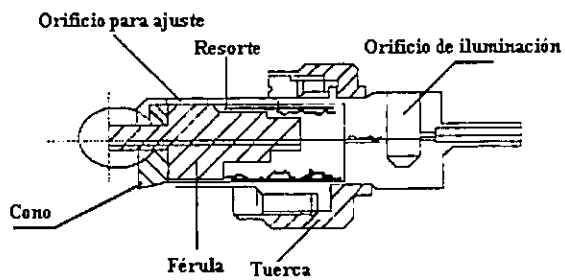
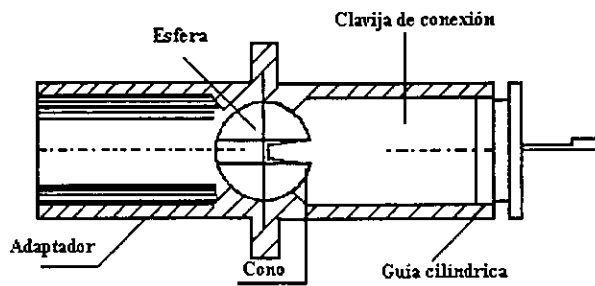


fig. 31 Conectores de excentricidad ajustable

## Emisor y Receptor óptico

Los emisores y receptores ópticos constituyen los equipos denominados terminales ópticos de línea y regeneradores de línea óptica que son los equipos que realizan la conversión de señal eléctrica a señal luminosa. En el sentido de transmisión convierten el tren de impulsos digitales en pulsos que modulan un diodo láser o un fotodiodo cuya emisión de luz se transmite por una fibra óptica. En el sentido de recepción convierte las variaciones de luz recibidas en un tren de impulsos digitales.

### Configuración de una terminal óptica

Las transmisiones ópticas pueden representarse de una forma sencilla como en la figura 31: en el transmisor se convierte la señal eléctrica en una señal óptica mediante un transductor electroóptico, por ejemplo, diodo electroluminiscente (LED) o diodo láser (LD). Formulándolo de una forma más precisa se podría decir que, mediante la corriente en el diodo modulada por impulsos binarios  $i_1$ , se modula la intensidad luminosa del diodo emisor inyectándose luz con una potencia  $p(0)$  en la fibra óptica (FO). Una vez que la luz ha recorrido la fibra óptica, se reconvierte en una señal eléctrica al final del trayecto en un transductor opto-eléctrico, por ejemplo un fotodiodo, en el receptor. La ruta de transmisión óptica comienza y finaliza, por lo tanto, en una interfaz eléctrica, cuyos datos independientemente del medio de transmisión están normalizados utilizándose para los sistemas digitales sobre fibras ópticas, por principio, las mismas interfaces, tal como se aplican para los radioenlaces y los equipos multiplexores.

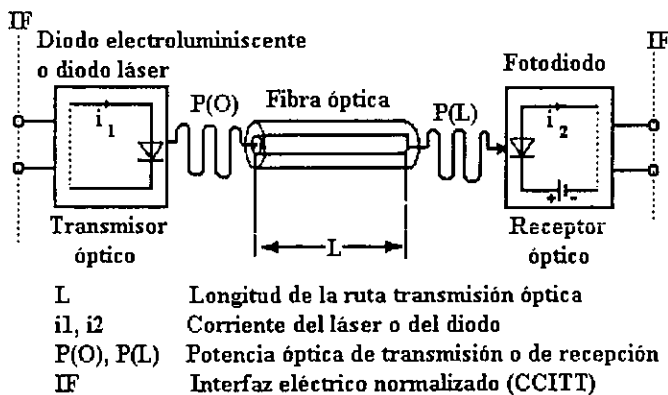


fig. 32 Principios de la transmisión óptica

Para la transmisión de señales ópticas por fibras se precisan como transductores optoelectrónicos componentes, receptores y transmisores cuyas características están definidas por especificaciones del sistema, es decir, ante todo por la longitud y la velocidad de transmisión.

Esto particularmente para los componentes de transmisión significa:

- La emisión de los impulsos luminosos tienen que tener lugar en el margen espectral para el cual se presente la mínima absorción y/o dispersión en la fibra óptica.
- La potencia radiada acoplada en la FO ha de ser la mayor posible. Esto significa no solamente un rendimiento de traducción electroóptica elevada sino también un rendimiento elevado del acoplamiento óptico en la fibra.
- La emisión óptica debe ser modulable en forma sencilla por la señal transmitida.

Para los componentes de recepción se pueden enumerar también en forma análoga:

- La sensibilidad de recepción debe ser lo mayor posible manteniendo simultáneamente las mejores condiciones de ruido. De esta forma, incluso con esta frecuencia de error binaria predeterminada es detectable todavía una potencia óptica mínima.
- Para la velocidad de transmisión deseada, la velocidad umbral tiene que ser lo suficientemente grande. Estos elementos constituyen como elemento principal, un terminal óptico de línea, incluyendo ambas funciones de transmisión y recepción en un mismo módulo llamado equipo terminal óptico (OLTE).

Estas condiciones las cumplen, por una parte, los diodos electroluminiscentes (como transmisores), por otra parte, los fotodiodos (como receptores) precedentes de semiconductores III-V y con ciertas limitaciones también el silicio y el germanio.

### **Configuración de un sistema**

Un sistema de transmisión por fibra óptica, se utiliza para comunicar una central A con una central B, con una velocidad de transmisión para un cuarto orden jerárquico de 140 Mb/s o quinto orden 565 Mb/s, y actualmente tecnología SDH. En enlaces de abonado y en enlaces urbanos, el sistema en su forma más simple se compone de dos terminales ópticas de línea (OLTE), localizados uno en cada central, enlazados por un par de fibras ópticas para transmisión y recepción respectivamente (ver figura 33).

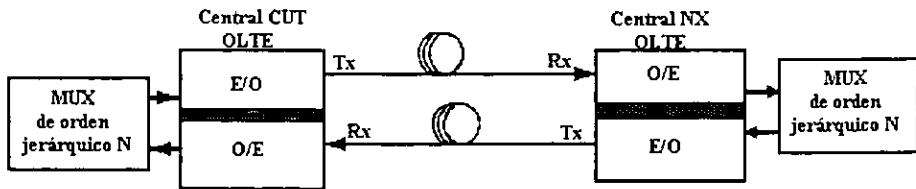


fig. 33 Ejemplo de un sistema de transmisión por fibra óptica (OLTE)

Por el contrario en enlaces de ciudad a ciudad con una gran longitud del enlace, se utilizan regeneradores ópticos intermedios para compensar o amplificar la atenuación que sufre la señal debido a la distancia, por ejemplo en la figura 34 se muestra un enlace de Monterrey a Hermosillo.

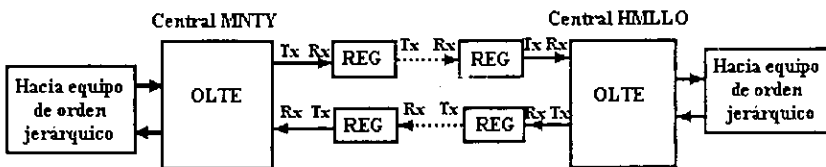


fig. 34 Ejemplo (enlace de Monterrey a Hermosillo)

### Configuración de un OLTE

Una terminal óptica de línea (figura 35) en términos generales se puede decir que constituye en cinco partes principales que son:

- 1) Modulo interface y transcodificador de código. Amplifica la señal en amplitud y tiempo, y en algunos casos cambia el código CMI a otro código de mayor definición por ejemplo el código 5B/6B para transmitirse hacia la fibra óptica.
- 2) transmisor óptico (XMT). (Convierte la señal eléctrica en señal óptica para transmitirse a la fibra su componente principal es un diodo electroluminiscente o diodo láser). En emisores ópticos para una velocidad de 140 Mb/s y de más alta jerarquía se emplea el diodo láser por su rápida velocidad de conmutación.
- 3) Receptor óptico (RCV). (Convierte la señal óptica procedente de la fibra a la señal eléctrica. Su componente principal es un fotodetector o fotodiodo).

- 4) Modulo de alarmas. A este modulo le llegan todas las informaciones de alarmas que indica que una falla en la transmisión o en la calidad de transmisión. procesa estas informaciones y los presenta en forma de anuncios luminiscentes en una pantalla de una PC o equipo de supervisión, o por medio de bucles con cierre de contactos.
- 5) Fuentes de alimentación (convertidores). Estas unidades convierten la tensión de batería en tensiones que se utilizan para alimentar los distintos módulos o tarjetas que componen un terminal óptico.

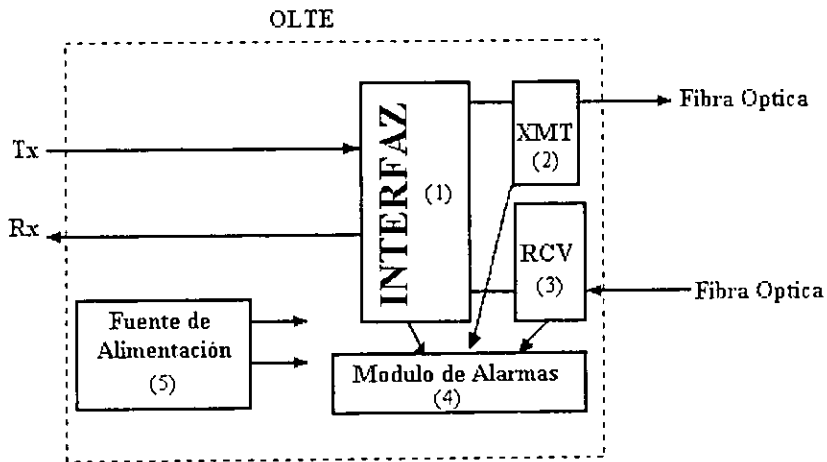


fig. 35 Configuración de un terminal óptico de línea

### Diodo electroluminiscente (LED)

Un LED clásico se presenta en forma de un paralelogramo rectangular. Los fotones se generan en una zona de recombinación, es decir, en el plano de la unión entre la región p y la n. Estos fotones se emiten de manera isotrópica; es decir, en todas direcciones. Sólo los fotones que salen por la cara frontal pueden inyectarse en la fibra, de modo que es importante observar, entre todos los fotones emitidos por la unión, cuáles son los que efectivamente saldrán del cristal por la cara frontal.

Para salir del cristal, un fotón debe primero atravesar la región p y no ser absorbido. a continuación debe refractarse por la interfaz de salida y por último, ser transmitido y no reflejado sobre esta misma interfaz.

Un fotón que se propaga en un cristal semiconductor puede ser absorbido. Un fotón emitido en la unión tiene una energía del orden de la banda prohibida; puede, por tanto, inducir la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y de esta forma ser absorbido. Para la longitud de onda  $\lambda$  de un fotón, el cristal tiene un coeficiente de absorción óptica  $\alpha(\lambda)$ .

Cuando el fotón no es absorbido alcanza la interfaz semiconductor-aire, la cual debe atravesar. El fotón llega de un medio de índice elevado (el semiconductor) hacia un medio de índice (el aire); debido al fenómeno de refracción, todo fotón que llega a la interfaz con un ángulo  $\theta$  superior al ángulo crítico de reflexión total de  $\theta_c$ , se refleja hacia el cristal y no puede salir:

### Diodo láser

Por principio el diodo láser es un diodo electroluminiscente como un elemento selectivo de la longitud de onda, en el caso más sencillo con resonador denominado Fabry-Perot, que se compone básicamente de dos espejos semitranslúcidos paralelos planos. Este resonador provoca que, ya con una intensidad total baja de luz, la intensidad de la luz de longitud de onda y fase equivalentes sea grande; por lo tanto, que se implante la emisión estimulada incluso con corrientes de inyección bajas. La amplificación de la luz mediante emisión estimulada (Láser: Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) da como resultado una elevada potencia de salida óptica y mejor enfoque de la luz transmitida. Es decir que con ellos se obtiene una potencia óptica acoplada en la fibra sensiblemente más elevada y, por lo tanto, que se pueden cubrir mayores atenuaciones de la fibra. Por otra parte, el espectro emitido (figura 36) es sensiblemente más estrecho en comparación con el LED, por lo que también es menor la dispersión cromática en la fibra.

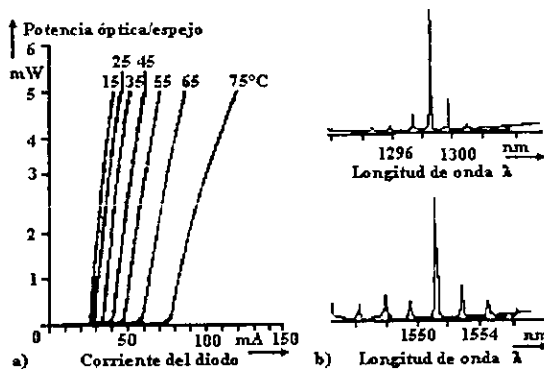


Fig. 36 Curvas características corriente-luz (a) y espectros (b) de diodos láser

En la figura 36 se reconoce la curva característica corriente-luz típica del diodo láser: por encima de la corriente llamada umbral la emisión luminosa se incrementa con gran pendiente; esto se hace ostensible en las propiedades de modulación de los diodos láser. Una subida rápida de corriente conduce después de un retardo hacia la emisión estimulada. Sin embargo, cuando el diodo láser trabaja con una corriente continua de polarización próxima al umbral, desaparece este defecto de retardo: en este caso, las frecuencias límite de modulación que es factible alcanzar se extiende hasta el margen de los gigahercios.

En la siguiente tabla se han reunido los parámetros y características relevantes de los diodos láser para la transmisión óptica de señales digitales.

		Diodo Láser	
Longitud de onda $\lambda$	Nm	800 a 885	1300 1550
Anchura espectral $\Delta\lambda$	Nm	3 a 5	0.3 a 5
Material semiconductor		GaAlAs/GaAs	GaInAsP/InP
Emisor		Coherente	Coherente
Tiempo de conmutación	Ns	<1	<1
Fibra de índice Gradual	MW	1 a 5	1 a 3
Fibra monomodo	MW		0.5 a 1.5
Longitud de transmisión a una velocidad de	Km Mbit/s	5 a 20 $\leq 565$	Hasta aprox. 70 $\leq 1200$

Junto a todas sus ventajas, el diodo láser tiene también un comportamiento de funcionamiento crítico causado por el rendimiento diferencial elevado (ver figura 36). Es ostensible que incluso reducidas oscilaciones de corriente así como de temperatura producen variaciones de potencia óptica, es decir, que una potencia de radiación constante se obtiene solamente con un cierto costo de regulación. Para tal fin, en un modulo láser (ver figura 37) se mide directamente a través de un diodo monitor un parte proporcional de la radiación emitida por el diodo láser, y por ello se envía como fotocorriente proporcional a un circuito externo de regulación. La temperatura del diodo láser se regula mediante la medida en el termistor; siendo ajustable dentro de límites determinados ( $\Delta T \approx 40$  K) independientemente de la temperatura ambiente y de la potencia de funcionamiento del láser, con una disposición activa de calor a través de un disipador peltier. El circuito de regulación esta conectado al modulo exteriormente.

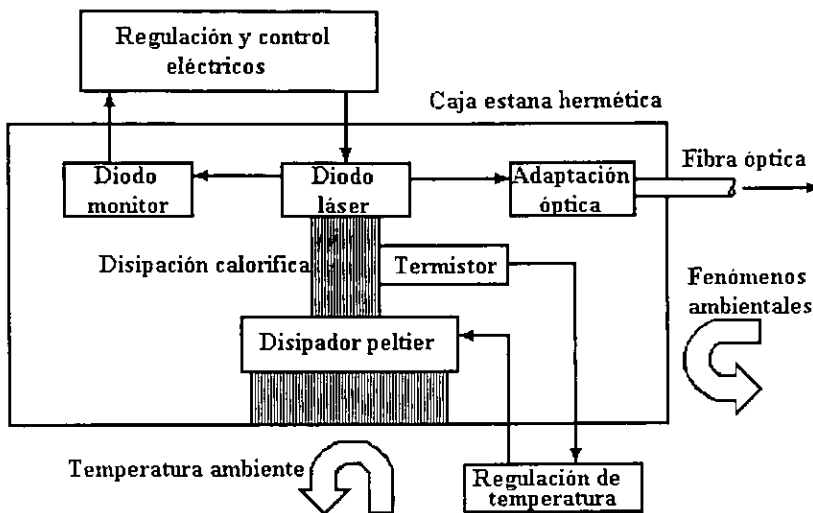


fig. 37 Principio de la estructura de un diodo láser

Finalmente, la oscilación máxima permitida de la potencia de salida en la fibra no puede sobrepasar aproximadamente el 5% con una temperatura ambiente entre 0 y 60 °C. Esto significa también que el desajuste de la fibra transversal el eje óptico debe permanecer menor que 0.1  $\mu\text{m}$ . esto es un requisito para el rendimiento de acoplamiento máximo.

Para el funcionamiento del láser tiene gran importancia el cierre hermético de la estructura modular de los componentes necesarios de medida, regulación y adaptación (pureza máxima del espejo del láser y de la óptica de la fibra).

### Diodos receptores

Al final de un tramo de transmisión, los impulsos ópticos inciden sobre un fotodetector que los convierte en impulsos de corriente proporcionales a su potencia óptica: conectado junto al fotodetector se encuentra un amplificador de bajo ruido, ya que la distancia que se puede cubrir por un sistema de transmisión por fibra óptica es tanto mayor cuanto menor sea la potencia óptica que puede ser evaluada por el receptor. Un buen fotoreceptor tendrá que poder elaborar fotocorrientes generadas menores que 1  $\mu\text{A}$ .



En sistemas de transmisión por fibra óptica se emplean siempre como fotodetectores, fotodiodos semiconductores (funcionamiento en sentido de corte). Según la aplicación se fabrican de silicio, germanio o fosfuro-arseniuro-galio-indio (InGaAsP), sus dimensiones están adaptadas aproximadamente al diámetro de la fibra.

En la figura 38 se han reunido los parámetros de los elementos receptores en la actualidad para dar una mejor vista de conjunto. Se diferencian por su fotosensibilidad, su margen de longitud de onda en funcionamiento con ello, finalmente, en la velocidad binaria de transmisión que favorecen.

Según ellos se utilizan fotodiodos PIN y los denominados fotodiodos de abalancha (APD); en estos últimos la fotocorriente se amplifica alrededor de diez hasta cien veces debido al efecto abalancha. En los nuevos APD de InGaAsP la ganancia de abalancha es sensiblemente de más bajo ruido que en los APD de germanio. Por lo tanto, se aplican preferentemente para elevadas velocidades binarias en el margen de longitudes de onda de 1300 a 1600 nm.

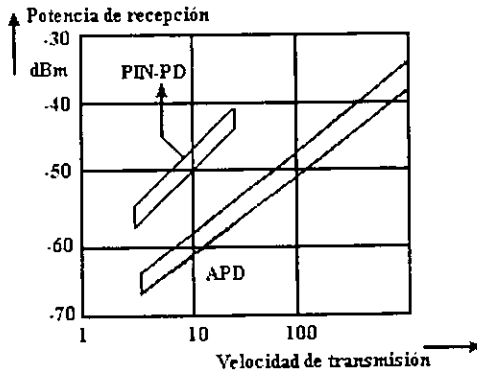


fig. 38 Parámetros de los diodos receptores

	Longitud de Onda nm	Material Semiconductor	Ganancia (x Veces)	Sensibilidad Espectral
PIN-PD	400 a 1000	Si	Ninguna	Todas
APD	400 a 1000	Si	10 a 100	De
PIN-PD		Ge	Ninguna	
APD		Ge		
PIN-PD	900 a 1600	InGaAs/InP	Ninguna	0.7 a 0.9
APD	900 a 1600	InGaAs/InP	10 a 50	

Tabla de la figura 38

## Conectores ópticos

Los empalmes para el enlace de las fibras ópticas y los conectores de la entrada y a la salida del sistema establecen el enlace continuo de la comunicación. En la figura 39 se muestra una construcción de conectores que se ha acreditado universalmente.

Sus características son una mínima atenuación de paso, montaje sencillo, escritura estable, conexión repetible, así como protección de las superficies de la fibra óptica contra daño y suciedad.

Una partícula de polvo de  $5\ \mu\text{m}$  sobre un núcleo de una fibra óptica de aproximadamente  $40\ \mu\text{m}$  de diámetro daría lugar a una atenuación de dispersión de aproximadamente 0.1 dB. Otras causas de las atenuaciones en los conectores y empalmes ópticos son:

- 1) Diferentes características (perfil del índice de refracción, diámetro de núcleo y del revestimiento, apertura numérica) de las fibras ópticas a conectar.
- 2) Fallos mecánicos del conector o del empalme.
- 3) Reflexión y dispersiones en los puntos de conexión.

En la práctica, estas tres causas de atenuación se representan simultáneamente; la atenuación total se calcula, por lo tanto, apartir de la suma de las atenuaciones individuales.

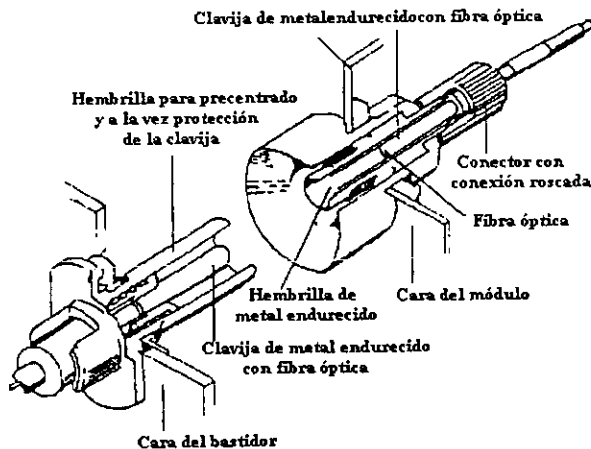


fig. 39 Conectores multimodo y monomodo

## Cap. 4 Etapa de transmisión y recepción

Un sistema de telecomunicación óptica sirve para transmitir mensajes utilizando las fibras ópticas como canales de transmisión. Los mensajes se transforman, en el emisor, en luz o flujo energético: este flujo energético emitido se transmite con ayuda de la fibra óptica hasta un receptor que lo transforma en mensajes. El receptor tiene entonces la función inversa del emisor.

El sistema de telecomunicación puede ser continuo, discreto o mixto.

En un sistema continuo, el mensaje y el flujo energético que se transmite son funciones continuas del tiempo; tal sistema se llama "analógico". El mensaje puede ser, por ejemplo, la variación de presión del aire o una corriente eléctrica.

En un sistema discreto, el mensaje y el flujo energético que se transmiten son secuencias de símbolos discretos. Tal es el caso, por ejemplo de la telegrafía o de un enlace entre dos computadoras.

Por último, un sistema puede ser mixto. En este caso, el mensaje y el flujo energético no son totalmente continuos ni discretos. Puede suceder que el mensaje sea continuo o analógico mientras que el flujo energético transmitido es discreto.

### Transmisión de señales analógicas

El mensaje se transforma primero en una señal eléctrica analógica  $e(t)$ . En el emisor, la fuente óptica convierte esta señal eléctrica  $e(t)$  en una señal óptica  $p(t)$ : la amplitud o magnitud del flujo energético varían con el tiempo. Tal sistema recibe el nombre de modulación en banda de base; hay modulación de la amplitud de la luz (portadora) alrededor del valor medio del flujo energético emitido. Por el momento no se han desarrollado sistemas analógicos en los que la frecuencia de la portadora (luz) sea modulada proporcionalmente a la señal eléctrica  $e(t)$ .

### Transmisión por medio de señales discretas

La información está contenida, a cada instante  $t$ , en la amplitud de una señal  $e(t)$  continua en el tiempo. Se puede mostrar que, en ciertas condiciones, el hecho de conocer el valor instantáneo de la amplitud de la señal  $e(t)$  sólo para algunos instantes sucesivos determinados, en lugar de conocerla para todos los instantes no provoca ninguna pérdida de información. Transmitir la información consiste entonces en transmitir los valores de la amplitud  $e(t)$  en instantes sucesivos regularmente espaciados. La toma de valores instantáneos se realiza por la operación llamada de muestreo.

Los valores de la muestra pueden transmitirse por medio de señales discretas (pulsos).

En la transmisión de pulsos, algún parámetro característico del pulso (amplitud, ancho o posición) se hace proporcional al valor de la muestra. Estos son los pulsos que después se transmiten.

En la transmisión digital, el valor de la muestra se convierte a forma binaria (sucesión de "0" y de "1"). Esta sucesión de "0" y de "1" se transforma en pulsos que se transmiten por la línea de transmisión.

## **Muestreo**

La señal continua  $e(t)$  puede descomponerse en una suma de señales sinusoidales simples que tienen ciertas frecuencias, las cuales están contenidas globalmente en una banda de 0 a B ciclos por segundo. B es la frecuencia más alta en el espectro de la señal  $e(t)$ . Para que el muestreo pueda definir completamente la función  $e(t)$ , la condición fundamental es que las muestras (medidas de valores instantáneos) se tomen en instantes separados a lo más  $1/2B$  segundos. Por lo menos, es necesaria entonces una frecuencia de muestreo igual a  $2B$ . Si se conoce la frecuencia del muestreo y los valores de las muestras, puede reconstruirse la señal  $e(t)$ .

## **Transmisión por pulsos**

Un tren de pulsos puede utilizarse para transportar la información muestreada. Este tren de pulsos se caracteriza por su frecuencia, la amplitud y la duración de un pulso; la frecuencia del tren de pulsos es la frecuencia del muestreo y del valor de cada muestra se transmite por medio de un pulso al cual se le modula un parámetro característico.

## **Modulación por pulsos**

### **Modulación de amplitud de pulsos (PAM)**

A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya amplitud es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen un ancho o duración  $W$  y un periodo  $1/2B$  constantes. Es necesario que  $W < 1/2B$  (ver figura 40).

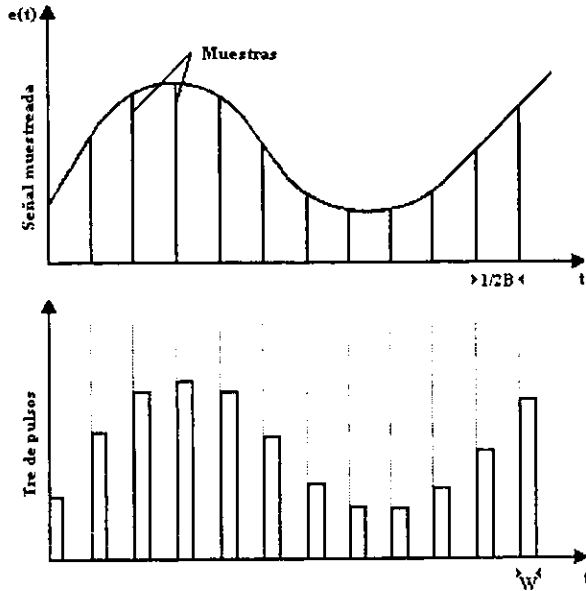


fig. 40 Modulación por amplitud de pulsos (PAM). La señal se convierte en un tren de pulsos de duración  $W$ , a la frecuencia  $2B$ , modulados en amplitud

Toda la información (magnitudes de las muestras y frecuencias de muestreo) se encuentran en la amplitud y en la frecuencia de los pulsos.

### Modulación por duración de pulsos (PDM)

A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya duración  $W$  es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen amplitud constante y frentes de subida separados  $1/2B$ . Es necesario que  $W < 1/2B$  (ver figura 41).

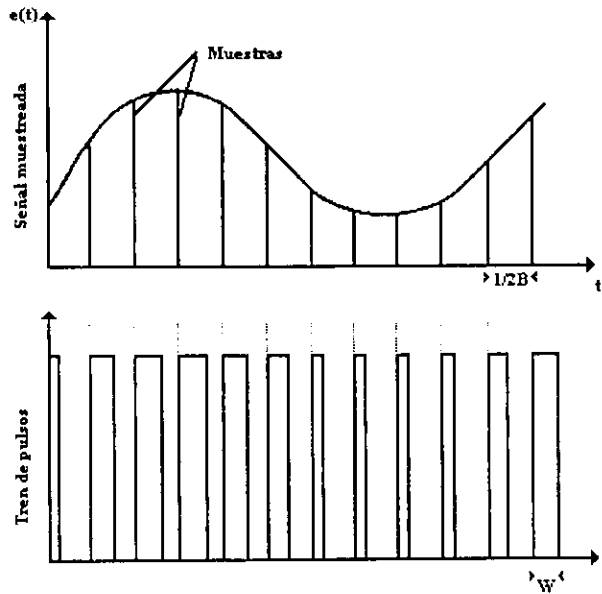


fig. 41 Modulación por duración de pulsos (PDM). La señal se convierte en un tren de pulsos a la frecuencia  $2B$  cuyas duraciones son moduladas

toda la información se encuentra en la frecuencia de los pulsos (es decir el tiempo que separa dos frentes de subida) y en su amplitud.

### Modulación por posición de pulsos (PPM)

A cada muestra se le hace corresponder un pulso desplazado un tiempo  $\Delta t$  con respecto al instante de muestreo  $t$  ( $\Delta t$  es proporcional a la magnitud de la muestra). Los pulsos tienen amplitud y ancho  $W$  constantes. Es necesario que el  $\Delta t$  más grande sea inferior a  $(1/2B - W)$  (ver figura 42). La información está contenida en  $\Delta t$ , de modo que es necesario transmitir al mismo tiempo una señal de sincronización que permita determinar  $\Delta t$  y la frecuencia de muestreo. Esta señal suplementaria no es necesaria en la modulación de amplitud o duración.

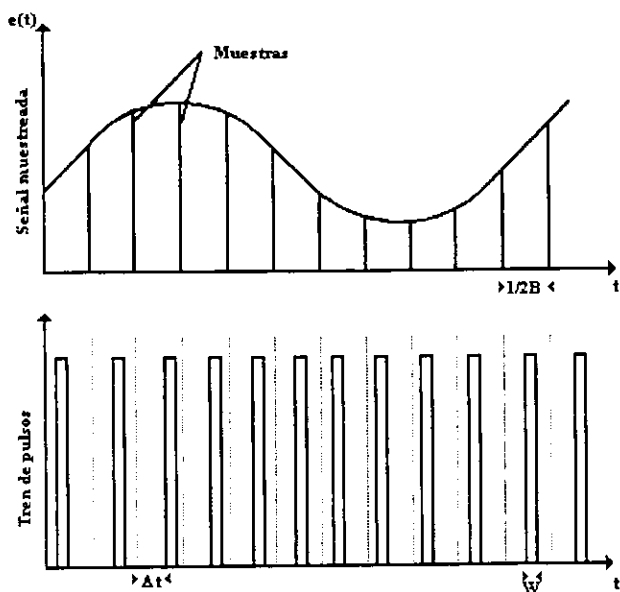


fig. 42 Modulación por posición de pulsos (PPM). La señal se convierte en un tren de pulsos de duración  $W$  en el cual las posiciones se modulan

En los sistemas de transmisión con modulación de pulsos, las bandas de paso  $B'$  requeridas son:

PAM	$B' = 1/W$
PAM 1/W	$B' \leq 5/W$
PAM	$B' = 5/W$

donde:  $W$  = es la duración del pulso (anchura).

### Demodulación

En el otro extremo del sistema de transmisión, el tren de pulsos modulados, después de ser amplificado o regenerado, debe demodularse para recuperar la señal  $e(t)$ .

En modulación de amplitud, el filtrado del tren de pulsos, con ayuda de un filtro ideal de paso bajo con frecuencias de corte igual a  $B$ , es suficiente para recuperar  $e(t)$ .

En modulación de duración es necesario hacer una conversión de PDM a PAM. Esta conversión se realiza por integración y muestreo sincronizado. La señal de sincronización se recupera con la ayuda de los frentes de subida de la señal modulada en duración.

En modulación, es necesario realizar una conversión de PPM a PDM seguida de otra conversión de PDM a PAM.

### **Transmisión por codificación de pulsos**

La información por transmitir, está contenida totalmente en los valores de las muestras y la frecuencia de muestreo. A estos valores se les puede hacer corresponder un número, que después puede convertirse a forma binaria (sucesión de 1 a 0). A esta sucesión de 1 a 0 (elementos binarios o bits), se hacen corresponder señales eléctricas (+ 5 V corresponden por ejemplo, al 1 y 0 V corresponde a 0). La descripción que acaba de hacerse es la de la conversión de una señal analógica  $e(t)$  a una señal numérica. La señal numérica puede enseguida modular la corriente de un LED o de un diodo láser para producir una señal óptica en forma digital (luz o ausencia de luz). Se describirá más detalladamente cada una de las etapas de la conversión de una señal analógica en una digital. El sistema que se describirá se le designa como modulación por codificación de pulsos o "pulse code modulation" (PCM) en inglés.

Se parte de una señal analógica  $e(t)$  cuya frecuencia más alta es igual a  $B$ : el muestreo ya se describió y se efectuó a una frecuencia  $2B$ .

### **Cuantización y codificación**

El objetivo de la cuantización y la codificación es asociar a cada magnitud de una muestra un número que la caracterice. Como las magnitudes de las muestras son variables continuas, se necesitaría, en principio, una infinidad de números para poder representar todas las magnitudes posibles de las muestras: La cuantización consiste en dividir la amplitud máxima  $E$  que pueden tener las diversas muestras en un número finito de niveles discretos. Cuando se muestra la señal, se le atribuye el valor del nivel discreto más próximo, en lugar de su verdadero valor. Los niveles discretos se numeran en valores crecientes. Cada muestra corresponde a un nivel y por tanto a un número. Este número está dado en forma binaria (sucesión de "1" y de "0"). Esta es la codificación.

Por tanto, la cuantización hace corresponder un número para cada valor de la muestra y la codificación convierte este número en una sucesión de "1" o de "0" (ver figura 43).



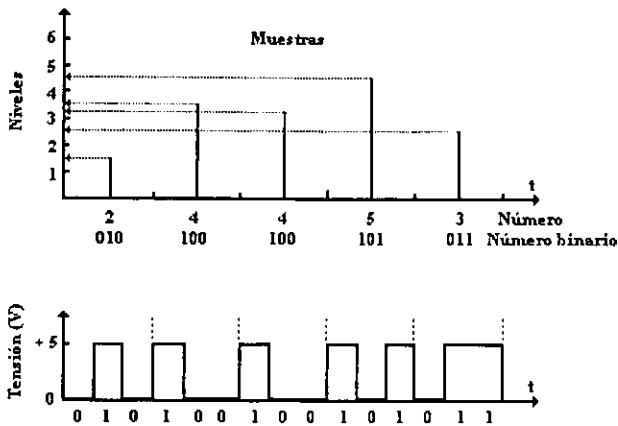


fig. 43 Modulación por codificación de pulsos. La magnitud de las muestras corresponde a un nivel; a cada nivel le corresponde un número binario, al cual se le asocia una señal eléctrica en forma digital

Así, a cada nivel le corresponde un código cuya longitud depende del número de niveles discretos en la cuantización. Entre más niveles discretos se escojan, menos errores de cuantización se introducirán, pero entre más bits tengan los números binarios, más grande tendrá que ser la banda de paso necesaria para transmitirlos. Si se divide la amplitud máxima de las muestras en segmentos iguales (cuantización lineal), se necesitan alrededor de 2 000 niveles equidistantes para que el error de cuantificación no perturbe la fidelidad (relación señal/distorsión) de la conversión, lo que requiere números de 11 bits y, por tanto, una banda pasante muy grande. Como la fidelidad se ve afectada sobre todo por la débil resolución (segmentos largos) para valores pequeños de las muestras (señal pequeña), los segmentos se toman más pequeños para un nivel pequeño y más largos para un nivel alto. La cuantización ya no es lineal. En realidad se hace una comprensión no lineal de las señales (las más altas son las más atenuadas) seguida de una cuantización lineal. Esta técnica permite utilizar sólo 128 niveles (7 bits).

El resultado final que para cada muestra de la señal analógica, las muestras tomadas a una frecuencia 2B, corresponden a una señal numérica de 7 bits.

En la salida del sistema de modulación por codificación de pulsos (convertidor analógico digital), la señal eléctrica se encuentra en forma de pulsos eléctricos cuadrados. Una tensión de 5 volts corresponde al "uno" binario y una de 0 volts al "cero" binario. Esta tensión puede utilizarse para que la fuente óptica emita luz cuando  $V = 5 \text{ V}$  y no emita luz cuando  $V = 0 \text{ V}$ .

## Otros códigos

La codificación que hace corresponder al "uno" binario un estado elevado (+ 5 V) y al "cero" binario un estado bajo (0 V) es más simple. Además es compatible con un sistema de comunicación óptica que pueda funcionar de manera discreta (luz o ausencia de luz) y corresponde a la menor velocidad de transmisión. Sin embargo, para las cuestiones de decodificación, eficiencia de recuperación del ritmo de la transmisión y del control de errores en la transmisión, pueden elegirse otros códigos.

Para aprovechar la gran banda pasante que ofrecen los sistemas de fibras ópticas, los códigos que aumentan el número de bits son, en general, mejor aceptados que los códigos formados mediante varios niveles diferentes. Si se tiene una "palabra" de 7 bits por codificar, esta palabra puede, por ejemplo, representar en forma binaria la magnitud de una muestra tomada de una señal analógica por la técnica del muestreo descrita anteriormente. La palabra 0 1 0 0 1 1 1 corresponde al nivel de treinta y nueve de una cuantización de ciento veintiocho niveles (ver figura 44).

## Códigos de línea

### Codificación sin regreso a cero (NRZ)

En la codificación NRZ, la señal está alta para toda la duración de un "uno" y baja para toda la duración de un "cero". A cada bit ("1" o "0") le corresponde un intervalo unitario durante el cual la señal eléctrica es alta o baja (ver figura 44).

Esta codificación tiene los siguientes inconvenientes:

- 1) Cuando se tiene una sucesión de "1", la señal eléctrica es una señal continua no pulsante, lo que obliga a tener circuitos electrónicos adecuados para identificar dos señales continuas: esto representa un inconveniente. Además, en la recepción no se puede distinguir si hay una sucesión de "0" o si se tiene una ausencia de señal.
- 2) Cuando se tiene sucesiones de "1" o de "0", no se puede sincronizar la recepción, ya que los intervalos unitarios no están definidos en el tiempo, por tanto no hay información de la frecuencia de muestreo y no se puede reconstruir  $e(t)$ .

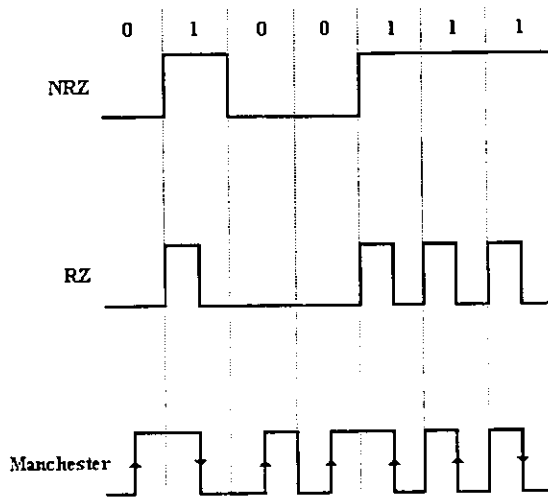


fig. 44 Diversos tipos de codificación. En codificación RZ y Manchester, se tienen dos intervalos unitarios por bit

### Codificación con regreso a cero (RZ)

En la codificación RZ, la señal es baja a lo largo del tiempo de duración de un "cero" y alta en la primera mitad de la duración de un "uno". Esta codificación necesita dos intervalos unitarios por bit, puesto que el bit "uno" se representa por un estado alto durante la mitad del tiempo del bit, lo cual impide que la señal quede alta durante una sucesión de "1". Los circuitos para identificar señales continuas ya no son necesarios. Sin embargo, la sincronización parece imposible durante una sucesión de "ceros" (ver figura 44).

### Codificación Manchester

En la codificación Manchester, el bit "uno" se representa por una transición del estado alto hacia el estado bajo, y el bit "cero" se representa por una transición del estado bajo al estado alto. Las transiciones que representan los bits se realizan en medio de la duración de un bit, por lo que son necesarios dos intervalos unitarios por bit. Como siempre se tiene una transición, sea cual sea el bit, la sincronización es fácil por lo que el acoplamiento continuo no es necesario (ver figura 44).

## Rapidez de transmisión

La tasa binaria de una transmisión es igual al número de elementos binarios o bits transmitidos por segundo. La unidad es el bit por segundo (bit/s).

La rapidez de modulación de una transmisión es el número de intervalos unitarios transmitidos cada segundo. La unidad es el baud. Los códigos RZ y Manchester necesitan dos intervalos unitarios por bit, mientras que el código NRZ utiliza un intervalo unitario por bit. Si la tasa binaria es de 64 kbit/s (PCM con  $B = 4$  kHz y cuantización de 7 bits, más un bit de control), el canal de transmisión deberá tener una rapidez de modulación de 64 kilobaud en codificación NRZ, y de 128 kilobaud en codificación RZ o Manchester. Cada intervalo unitario tiene una duración máxima de  $7.8 \mu\text{s}$  ( $1/128\ 000$  intervalos) en codificación RZ o Manchester y de  $15.6 \mu\text{s}$  en codificación NRZ, en el ejemplo escogido. La banda pasante requerida para el sistema es superior o igual a  $1/2T$ , donde  $t$  es la duración de un intervalo unitario.

## Demodulación

En la recepción, los pulsos codificados son demodulados mediante un convertidor digital analógico que realiza la operación inversa de la que se efectuó al principio. A los sistemas que efectúan las operaciones de conversiones analógica-digital (muestreo, cuantización) y digital-analógica, se les llama **codec** (codificador-decodificador).

## Regenerador intermedio

En sistemas de grandes distancias se utilizan regeneradores intermedios que regeneran la señal óptica, atenuada debido a la distancia. La señal óptica entrante debilitada es convertida en una señal eléctrica en el regenerador, a continuación se regenera y amplifica para luego con una nueva conversión se envía nuevamente en forma óptica.

## Técnicas de sistemas periféricos

En la práctica y más allá de la tarea específica de la transmisión óptica deben contemplarse una diversidad de criterios operativos importantes para la concepción de todo el sistema de transmisión.

Si por ejemplo están previstos regeneradores intermedios, será necesario determinar como deben de ser construidos y alojados. Puesto que en equipos de transmisión óptica no se manifiesta un potencial de cable elevado, como en la telealimentación de amplificadores

para cable coaxial, pueden ser colocados regeneradores intermedios de idéntica forma como los equipos terminales de línea.

Los regeneradores intermedios pueden alojarse sobre nivel en edificios de la administración de telecomunicaciones o bajo tierra en contenedores subterráneos respondiendo a la técnica de cable coaxial deberían preponderar las ventajas en caso de montaje subterráneo.

Regeneradores intermedios necesitan para su servicio una alimentación en lo posible sin interrupciones, en orden de magnitud de alrededor de 10 hasta 20 W. Mientras que en sistemas para cables coaxiales los regeneradores son telealimentados directamente a través del conductor interno del par coaxial, para el cable de fibra óptica deben emprenderse otros caminos.

Generalmente la energía necesaria puede extraerse de la red pública, que se encuentra en los edificios de la administración de telecomunicaciones. Para el servicio de emergencia existe la batería con carga tampón de la red.

Para puestos intermedios sin conexión a la red deben preverse otras medidas, por ejemplo, la energía necesaria puede obtenerse a partir de células solares, fuerza eólica o diversos procesos de combustión. Si se evalúan las distintas fuentes en forma más precisa, la solución más conveniente resulta ser la clásica alimentación en serie por corriente continua, excepto el caso especial de energía solar.

Al utilizarse un cable de telealimentación teniendo paralelamente respecto al cable óptico, pueden telealimentarse varios sistemas desde un sistema de alimentación. Así se satisfacen óptimamente las exigencias relativas a telealimentación con redundancia, protección personal y detección.

Para localizar averías de cables y equipos sobre un tramo (como en los sistemas de cables coaxiales) están previstos procesos de localización. Según el sistema que utilizaran los procesos "cierre de bucle" durante el servicio.

Para evitar posibles riesgos en la vista de personas, los emisores láser deben ser desconectados inmediatamente cuando la luz pueda salir de una fibra interrumpida. De esta manera se garantizan que tampoco personas ajenas sufran daños, ni aún cuando un cable de fibra óptica cortado se encuentre a la vista.

De acuerdo al estado actual de la normalización todavía no existen límites obligatorios para la radiación láser no peligrosa en caso de cables de fibra óptica cortados, si se trasladan valores de las áreas afines, los valores en la transmisión óptica estarán según definición apenas encima o debajo del límite crítico. Para excluir toda discusión, está prevista la desconexión automática citada precedentemente (ver figura 45).

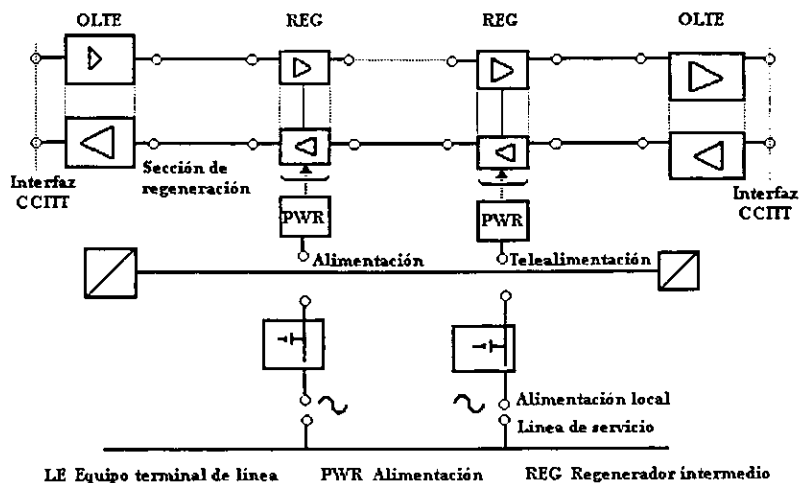


fig. 45 Disposición básica de un enlace de transmisión óptica con alimentación de energía y, dado el caso línea de servicio

### Regenerador intermedio

Un regenerador intermedio contiene dos módulos regeneradores separados, uno por cada sentido de transmisión. Cada módulo regenerador consta, fundamentalmente de un receptor óptico, el regenerador propiamente dicho y un transmisor óptico.

En la figura 46 aparece el diagrama a bloques de un regenerador típico.

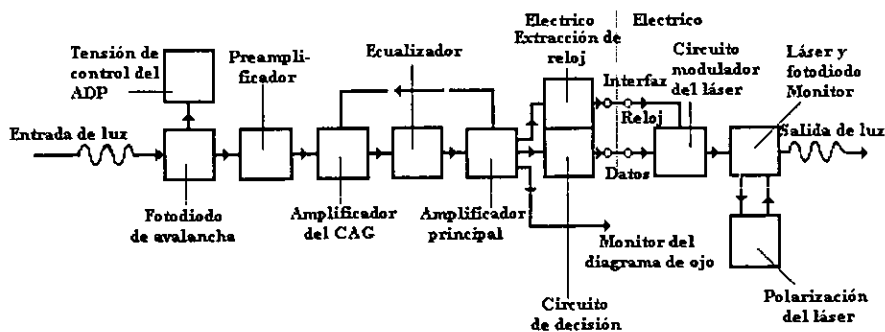


fig. 46 Módulo regenerador utilizado en la instalación experimental de cable submarino de Loch Fyrsa (Escocia)

Al igual que en cualquier otro sistema de líneas, el sistema de líneas ópticas requiere repetidores en el extremo de recepción. Si los sistemas están separados por grandes distancias (> 40 ó 100 Km) es necesario colocar repetidores a intervalos regulares en el camino (en aquellos puntos en los que la atenuación de la fibra haya reducido el nivel de la señal a un valor cercano al mínimo nivel que puede detectar el receptor). En sistemas ópticos la señal óptica recibida se convierte en primer lugar en una señal eléctrica, esta señal se regenera y luego se decodifica (estaciones terminal) o se vuelve a convertir en señal óptica (repetidores intermedios).

Los repetidores en los sistemas digitales regeneran la señal en vez de amplificarla. La regeneración implica un detector que determina el nivel lógico de cada bit en la entrada y transmite esta información a un generador que origina el nivel lógico correspondiente en la salida del regenerador. Dado que se genera una señal "nueva" cualquier ruido o deformación de la señal de entrada se elimina.

La detección de los niveles lógicos de las señales de entrada se realiza mediante un detector de umbral. Este es un dispositivo que produce un nivel lógico 1, si la señal excede un voltaje umbral predeterminado, y un nivel lógico 0, si la señal de entrada no alcanza este valor. Dado que el detector de umbral opera con un voltaje fijo predeterminado, el nivel medio a la entrada del regenerador va precedido por un amplificador con control automático de ganancia (AGC), que equilibra cualquier variación en la atenuación del cable (debido a la longitud del cable o a condiciones ambientales). Dado que el repetidor genera autónomamente la salida (con los mismos niveles lógicos que la señal de entrada) y dado que tiene que detectar el nivel lógico de cada bit de entrada, se necesita una señal de reloj que guarde una relación de fase constante con la señal de entrada.

Para generar esta señal, se utiliza un bucle enganchando en fase (PLL) sincronizado con la señal de entrada.

En la figura 47 se utilizan los principios del circuito regenerador.

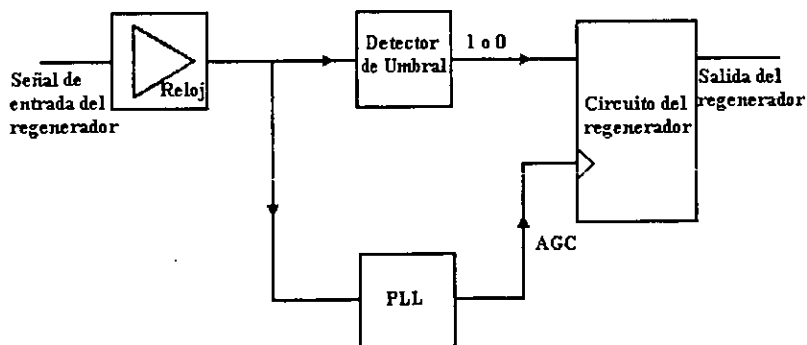


fig. 47 Principios del circuito regenerador

En la figura 48 se muestran tres periodos de impulsos y la deformación típica de cualquier combinación de los niveles lógicos de los tres impulsos, así como el consecuente efecto adyacente que los impulsos tienen entre si. Este diagrama se denomina diagrama de ojo e ilustra el punto (en tiempo y voltaje) en el que es más favorable ajustar el nivel del detector umbral. El punto se selecciona en la mitad del ojo, porque este es el punto en el que es menos probable que influencie ruido que se superponga a la señal (si debido la ruido se sobrepasa el umbral en el momento de decisión, se genera un error).

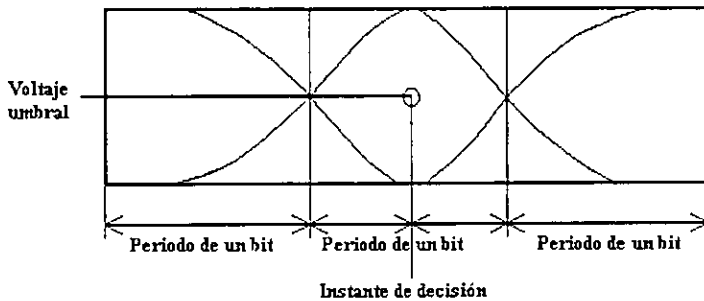


fig. 48 Diagrama donde se muestran tres periodos de impulsos y su deformación

### Repetidores de central

Los repetidores de central convierten la señal óptica en una señal eléctrica. Esta señal se regenera a continuación, como ya se indicó y se convierte de señal eléctrica en señal óptica, los repetidores de central se montan en bastidores y subbastidores similares a los utilizados por el equipo terminal e instalado en estaciones que dispongan de alimentación local.

### Separación de repetidores

Antes de instalar un sistema de línea óptica, al calcular la separación entre repetidores, deben considerarse los parámetros que afectan a la potencia óptica. Los cálculos deben realizarse de forma que garanticen, en cualquier circunstancia, que la potencia óptica en la entrada del receptor sea de un nivel suficiente para que el sistema funcione con una tasa de error aceptable ( $\leq 10^{-10}$ ) este cálculo se denomina presupuesto de potencia.



Al realizar este presupuesto deben tomarse siempre los peores valores posibles de las diferentes características, considerando asimismo la degradación de estas características durante la vida útil esperada del sistema y del cable. En los cálculos deben incluirse ciertos márgenes operativos para permitir fluctuaciones en los valores de las características debidos a tiempo y a la temperatura. Estos márgenes operativos difieren de instalación y de país a país.

## Preamplificadores

Hemos examinado las características de comportamiento en algunas clases generales de repetidores, ahora pondremos atención en algunos tipos específicos de preamplificadores receptores. Como la sensibilidad y el ancho de banda son dominados por las fuentes de ruido en la sección de entrada. (etapa de preamplificación), el mayor énfasis es en el diseño de un preamplificador de bajo ruido. Los objetivos generalmente son para mejorar la sensibilidad del receptor mientras mantenga un ancho de banda aceptable.

Los preamplificadores utilizados en repetidores de comunicaciones por fibra óptica pueden ser clasificados dentro de tres externas categorías. Estas categorías no son actualmente distintas, desde que unos continuos diseños intermedios son posibles, pero estos sirven para ilustrar los diseños aproximados. Las tres categorías abarcan los preamplificadores de baja impedancia, de alta impedancia y el de tras impedancia.

- 1) El preamplificador de baja impedancia (LZ): Es el más normal pero no necesariamente el de diseño óptimo. En este diseño un fotodiodo opera dentro de un amplificador de baja impedancia (por ejemplo  $50 \Omega$ ). Aquí una polarización o carga resistiva  $R_0$  es utilizada para igualar la impedancia del amplificador (para suprimir la onda estacionaria de la respuesta uniforme de frecuencia). El valor de la carga resistiva en conjunto con la capacitancia de entrada del amplificador, es tal que el ancho de banda del preamplificador es igual o más grande que el ancho de banda a la señal. Aunque el preamplificador de baja impedancia puede operar sobre diferentes anchos de banda, no puede proporcionar sensibilidades antes de recepción, porque solo una pequeña señal de voltaje, puede ser desarrollada a través de la impedancia del amplificador de entrada y el resistor  $R_0$ . Estas limitaciones no sirven para amplificaciones especiales de corta distancia, donde la alta sensibilidad no es prioritaria.
- 2) El preamplificador de alta impedancia (HZ). La finalidad de su diseño es de reducir todas las fuentes de ruido a un valor mínimo. Esto es conveniente para reducir la capacitancia de entrada a través de la selección de baja capacitancia, dispositivos de alta frecuencia, seleccionando un detector con baja corriente de oscuridad y minimizando la contribución de ruido térmico debido a la resistencia de polarización, el ruido térmico puede ser reducido utilizando un amplificador de alta impedancia (tal como un transistor bipolar o un FET) conjuntamente con un fotodetector con una gran resistencia de polarización  $R_0$ , con la cual este diseño está referido a un preamplificador de alta impedancia. Desde la alta impedancia se produce una gran constante de tiempo RC a la

entrada, el ancho de banda entrante es menor que el ancho de banda de la señal. Desde este modo la señal entrante es integrada y ecualizada (ver figura 49).

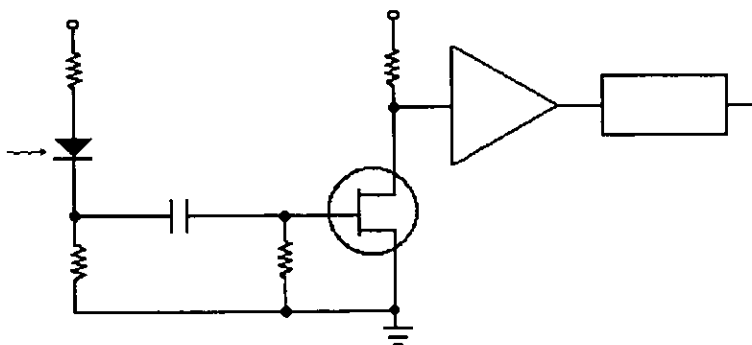


fig. 49 Diagrama de un preamplificador de alta impedancia

- 3) El preamplificador de transimpedancia: diseñado para superar grandemente los inconvenientes del preamplificador de alta impedancia. Esto es medio utilización de un amplificador de alta impedancia con bajo ruido y una resistencia  $R_f$  de retroalimentación negativa con una corriente de ruido térmico  $i_f(t)$  equivalente derivado a la entrada el amplificador tiene a la entrada una fuente de voltaje de ruido equivalente serie a la entrada  $e_a(t)$ , una corriente de ruido equivalente en paralelo  $i_a(t)$ , y una impedancia de entrada dada por la combinación en paralelo de  $R_a$  y  $C_a$ .

El ruido es minimizado si las resistencias de polarización  $R_a$  y  $R_b$  son mayores. La capacitancia total  $C$  en la entrada del amplificador es pequeña y la corriente del ruido y amplitudes espectrales de voltaje  $S_I$  y  $S_E$  son pequeñas. En general estos parámetros no son independientes teniéndose que realizar una solución intermedia entre ellos para minimizar el ruido. En suma, las facilidades de diseño para optimizar los parámetros de los dispositivos es frecuentemente restringido por la limitada variedad de componentes disponibles (ver figura 50).

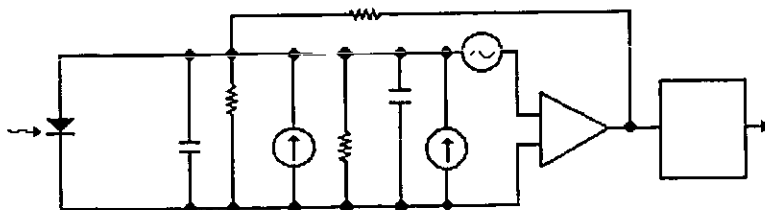


fig. 50 Diagrama de un preamplificador de transimpedancia

## Medición de potencias ópticas

La medición de potencia óptica es uno de los parámetros principales que se deben revisar al recibir un terminal óptico, ya que al realizar esta medición nos muestra el rendimiento de un terminal óptico y del par de fibras utilizadas en X enlace.

La potencia radiada acoplada en la fibra óptica ha de ser lo mayor posible, dentro de las especificaciones del proveedor. Se medirá la potencia que emite el terminal óptico y la potencia que se recibe del extremo remoto antes del receptor óptico.

Para medir la potencia de transmisión se utiliza un cable de fibra óptica con conectores, cuya atenuación sea ya conocida (ver figura 51).

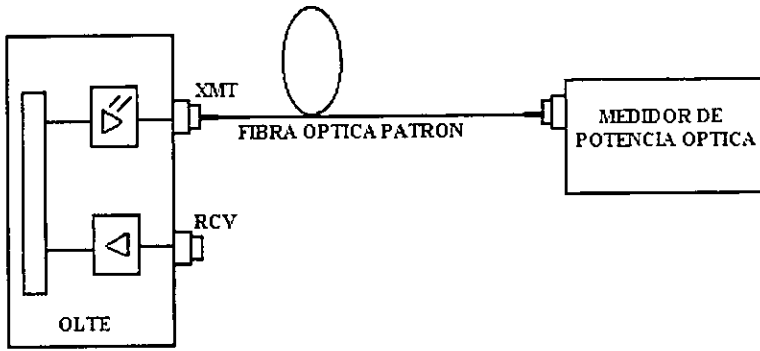


fig. 51 Medición en transmisión

Normalmente las potencias, dependiendo de las especificaciones del fabricante están por encima de  $P_{trans} \geq -4.5$  dB (ver figura 52).

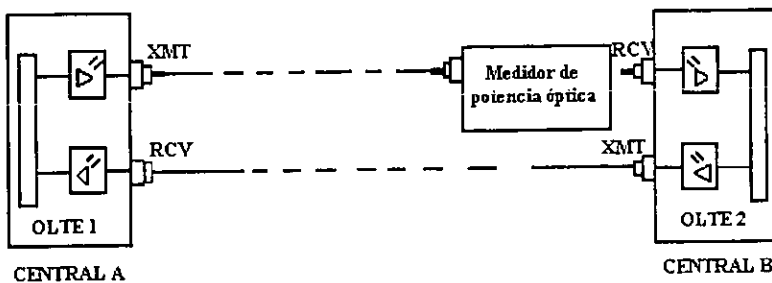


fig. 52 Medición en recepción

## Cap. 5 Diseño de un sistema de comunicación por fibra óptica

Las fibras ópticas se utilizan para transportar información. Los campos de utilización de las fibras son muchos. Un usuario puede emplear, por ejemplo, un sistema de telecomunicación por fibra óptica en una distancia de 10 metros, para transmitir una señal analógica de 5 kHz proporcionada por un transductor. Por ejemplo, las propiedades dieléctricas de la fibra óptica justifican esta selección en un medio inflamable. Otro usuario se vale de una fibra óptica para transmitir 4 032 conversaciones telefónicas en PCM (8 bits por muestra, 64 kbit/s por canal y 281 Mbit/s en total) a gran distancia. A pesar de que esos usuarios emplean fibras ópticas, los sistemas serán realizados por medio de elementos muy diferentes (emisores ópticos y sus circuitos de modulación, acopladores, fibras, detectores ópticos y preamplificadores principalmente). La concepción y la realización de un sistema de telecomunicación óptica deben adaptarse al problema particular a resolver. Es por tanto primordial conocer las características esenciales del enlace óptico a realizar, a fin de efectuar una selección juiciosa de los diversos elementos constitutivos.

Un sistema de telecomunicación sirve para transmitir información a distancia. Esta información puede ser analógica o digital.

Primer dato fundamental que debe conocerse: el tipo de señal por transmitir.

Segundo dato fundamental, relacionado con la cantidad de información que hay que transmitir por unidad de tiempo: el ancho de banda máximo para un sistema analógico o la velocidad de transmisión binaria para un sistema digital.

Tercer dato fundamental: la cantidad de la señal eléctrica recuperada a la llegada. Esta cualidad depende de la utilización posterior de la señal recuperada y se especifica por el conocimiento de la relación señal/ruido ( $S/N$ ) para una transmisión analógica y de la tasa de errores de los bits (TEB) para una transmisión digital.

Cuarto dato fundamental: la longitud del enlace. Aquí existen dos posibilidades: el enlace puede efectuarse directamente, por medio de repetidores de línea. Sólo el estudio completo del sistema permite saber si se necesitan repetidores y cuantos serán necesarios.

Por último, un elemento fundamental que siempre debe guiar al usuario en la selección de los componentes: el precio del sistema, mismo que está en función de la selección de los diferentes componentes (fuentes, fibras, detectores, acopladores, dispositivos electrónicos) y de la facilidad de realización. Esto significa que cada vez que sea posible, debe seleccionarse un LED en lugar de un diodo láser, un fotodiodo pin en lugar de un fotodiodo de avalancha, una de índice escalonado en lugar de una fibra de índice gradual.

En un sistema de transmisión por fibra óptica, la fuente óptica, la fibra y el detector óptico están limitados en frecuencia. Se les puede, por tanto, considerar como filtros de paso bajo en serie que limitan las más altas frecuencias transmisibles.

## Calculo de la banda de paso o tiempo de subida requerido

La señal a transmitir puede ser analógica o digital.

Para una señal analógica, la banda de paso  $B$ , necesaria para transmitir la información es la frecuencia mayor por transmitir. Por ejemplo, ésta es de 4 kHz para una señal de audio, o de 5 kHz para una señal de vídeo. Se puede asociar a la banda de paso  $B$  un tiempo de subida mínimo requerido por el sistema.

$$T_s = \frac{0.35}{B}$$

Para una señal digital, la banda de paso mínima necesaria depende del tipo de modulación y de la velocidad de transmisión binaria  $B_r$ .

$$\text{En código NRZ} \quad B = \frac{B_r}{2}$$

$$\text{En código RZ} \quad B = B_r$$

Los tiempos de subida mínimos requeridos son:

$$\text{Código NRZ} \quad T_s = \frac{0.7}{B_r}$$

$$\text{Código RZ} \quad T_s = \frac{0.35}{B_r}$$

En la modulación por codificación de pulsos (PCM), la señal debe muestrearse por lo menos a la frecuencia más alta  $B$  de la señal analógica. Si se hace que correspondiera a cada muestra una palabra de  $N$  bits, la velocidad de transmisión binaria  $B_r$  es:

$$B_r \geq 2 \cdot B \cdot N$$

El tiempo de subida mínimo necesario es:

$$T_s \leq \frac{0.7}{2B \cdot N}$$

$$T_s \leq \frac{0.35}{B \cdot N}$$

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Por ejemplo, para una señal de vídeo de 4.2 MHz, la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos de 8.4 MHz. En general se toma 10.74 MHz, es decir, tres veces la frecuencia de la subportadora de color de 3.58 MHz, para reducir el riesgo de intermodulación.. Una codificación de 8 bits por muestra es suficiente para obtener una buena fidelidad. Se agregan 2 bits suplementarios para la sincronización y la detección de errores, lo que da 10 bits por muestra y una velocidad de transmisión de 107.4 Mbit/s. El tiempo de subida necesario será por tanto:

$$T_s \leq \frac{0.35}{107.4 \times 10^6} = 3.2 \text{ ns}$$

Una vez conocido el tiempo de subida mínimo necesario, hay que verificar si la fuente óptica, la fibra óptica y el detector óptico tienen tiempos de subida suficientemente cortos.

### Tiempo de subida de la fuente óptica

La rapidez de la fuente óptica (LED o diodo láser) está limitada por el tiempo de vida de los portadores inyectados. Este tiempo de vida se reduce por la emisión estimulada en el caso de los diodos láser. Los LED tienen bandas de paso que varían entre 5 y 50 MHz. Los diodos láser tienen bandas de paso que varían de 200 MHz a 1 GHz. Los tiempos de subida  $T_{so}$  de las fuentes ópticas son por tanto:

$$7 \text{ ns} < T_{so} < 70 \text{ ns} \quad (\text{LED})$$

$$350 \text{ ps} < T_{so} < 2 \text{ ns} \quad (\text{diodos láser})$$

### Pérdidas por acoplamiento y conexiones

Las más importantes son las pérdidas por acoplamientos entre la fuente y la fibra óptica. Estas pérdidas son las siguientes:

- a) Pérdidas de superficie  $D_s$  si la fuente tiene un área efectiva superior al área del núcleo de la fibra.
- b) Pérdidas por el diagrama de radiación  $D_{A,N}$ , notablemente las más importantes.
- c) Las pérdidas de Fresnel  $D_r$ , aproximadamente 0.2 dB de pérdida cada vez que se atraviesa una interfaz aire-fibra.

Las pérdidas son generalmente muy bajas en el detector óptico, si el área del detector es superior al área del haz luminoso que sale de la fibra.

Además, las pérdidas por conexión de fibra a fibra  $D_c$ , pueden agregarse si se utilizan conectores amovibles o si se hacen conexiones permanentes.

Todas esas pérdidas se evalúan en dB. La pérdida total es por tanto:

$$D_T = D_S + D_{AN} + D_R + D_C$$

### Problema

Dimensionar un enlace telefónico con fibra óptica el cual maneja 1920 canales de voz y 256 canales de señalización y sincronización.

La distancia a transmitir es de 200 km.

Se utiliza un código NRZ.

Velocidad de transmisión  $(1920 + 256)(64\ 000) = 139.264$  Mbps.

NRZ = 139.264 Mbps.

De tablas:

Para 200 MHz: 4.0 db / km  $\lambda = 1\ 300$  nm  $\phi_{nom} = 3$  mm 100 / 140  $\mu$ m

Transmisor

100 / 140  $\mu$ m

A.N. = 0.3

Potencia mínima = -12 dbm

Potencia máxima = -8 dbm

Receptor

100 / 140  $\mu$ m

BER =  $10^{-12}$

Potencia mínima = -31 dbm

Potencia máxima = -6 dbm

### Calculo de margen de potencia

1) Potencia óptica proporcionada por el transmisor:

-8 dbm

2) Perdidas en las terminales de conexión (conector):

De tablas 1db

3) Atenuación de cable (db / km):

De tablas 4 db / km

4) Longitud de cable (km):

200 km

5) Atenuación del enlace ( $db = P_3 \times P_4$ )

$(200 \text{ km})(4 \text{ db / km}) = 800 \text{ db}$

6) Numero de empalmes:

200 empalmes (empalme por cada 1 km)

7) Perdida por empalme:

de fabrica 0.02 db

8) Perdida total por empalmes ( $P_{10} \times P_{11}$ ):

$(200)(0.02 \text{ db}) = 4 \text{ db}$

9) Perdidas en el conector del receptor:

de fabrica 1 db

10) Mínima sensibilidad del receptor:

Potencia mínima = -31 dbm

11) Variación de potencia por temperatura (3 db aproximado):

3 db

12) Formato de señal (NRZ = -3 db ; RZ = -6 db):

-3 db

13) Perdidas por envejecimiento (3 db aproximado):

3 db

14) Margen de potencia (vida útil del transmisor) -1 db 80%:

-1 db



15)  $S/N$  \_\_\_\_\_ db      \_\_\_\_\_ BER       $S/N = 10 \log \frac{P_{\text{señal}}}{P_{\text{ruido}}} \text{ db}$  :

BER =  $10^{-12}$

16) Incremento de potencia (equipo nuevo = -3 db):

-3 db

17) Perdidas diversas \_\_\_\_\_ db:

5 db

18) Perdida total (db =  $P_2 + P_3 + P_{12} + P_{16} + P_{20} + P_{24}$ )

$1 + 800 + 4 + 1 + 3 + 5 = 814 \text{ db}$

19) Ajuste de potencia de salida ( $P_1 - P_{19} - P_{21} - P_{23}$ ):

$-8 - (-3) - (-1) - (-3) = -8 + 3 + 1 + 3 = -1 \text{ db}$

20) Margen de potencia total disponible ( $P_{26} - P_{17}$ ).

$-1 - (-31) = -1 + 31 = 30 \text{ db}$

21) Margen de potencia ( $P_{27} - P_{23}$ ):

$30 - 814 = -784 \text{ db}$

Perdidas db:

Conectores de 0.7 a 1 db

Empalmes de 0.02 a 0.05 db      -BW-

Fibra de 0.7 a 10 db / km      20 - 1 000 MHz km

Potencia óptica proporcionada por transmisor de -11 a -13 dbm

Mínima sensibilidad de receptor de -2.5 a 5.5 dbw

## GLOSARIO

**Apertura numérica (A.N.):** cono de aceptación que determina la cantidad de luz que puede aceptar una fibra.

**Azimutal:** ángulo diedro formado por el meridiano del lugar y el círculo vertical que pasa por un punto dado.

**Capacitancia:** componente de la reactancia de un circuito de corriente alterna debido a la capacidad del mismo.

**Codificación:** formar un cuerpo de señales llamado código que contenga toda la información referente a la señal.

**Concentricidad:** figuras, sólidos que tienen un mismo centro.

**Cromática:** cristal o instrumento óptico que presenta los objetos contorneados con los colores del arco iris.

**Cuantización:** magnitudes físicas que solo pueden tomar ciertos valores discretos.

**Decibel (dB):** unidad de intensidad de sonido igual a la décima parte de un bel.

**Demodulación:** consiste en separar la señal de modulación de la onda portadora y de las bandas laterales.

**Diafonía:** interferencia de conversaciones entre dos circuitos telefónicos.

**Dieléctrico:** medio material no conductor de la electricidad.

**Dispersión:** separación de las diversas componentes de un haz de luz en su espectro.

**Empalme:** ensamblado de dos piezas.

**Espectro:** resultado de la separación de dos componentes de distinta longitud de onda de la luz o de otra radiación electromagnética.

**Facsimil:** aparato para transmitir imágenes fijas a distancia.

**Fotodiodo:** diodo semiconductor sensible a la luz.

**Fotófono:** instrumento ideado para transmitir sonido mediante un haz luminoso.

**Heliógrafo:** instrumento para la transmisión de mensajes telegráficos por medio de un espejo plano en que se refleja la luz solar.

**Impedancia:** relación entre la intensidad de corriente alterna que circula por un elemento del circuito y la diferencia de potencial aplicada a sus extremos.

**Isotrópica:** que va en todas direcciones.

**Láser:** amplificador y oscilador que hace uso de la energía interna de los átomos para producir un haz de luz coherente.

**Modulador:** consiste en variar las características de una onda generalmente de radio, de acuerdo con determinadas características de otra onda.

**Monosomática:** un haz de luz con vida.

**Múltiplex:** transmisión simultánea de dos o más señales a través de un único canal de radio frecuencia.

**OLTE:** siglas que significan equipo terminal óptico de línea.

**Reflexión:** cambio de dirección que experimenta una partícula o una onda cuando choca con un obstáculo.

**Refracción:** cambio de dirección que experimenta la luz y en general cualquier onda cuando pasa de un medio a otro.

**Regenerador:** mecanismo de reparación de señales para reconstruir partes destruidas de la misma señal.

**Telecomunicación:** conjunto de medios de comunicación a distancia.

**telemática:** técnica para la medición de distancia entre dos señales.

**Transductor:** dispositivo que convierte la potencia eléctrica de una corriente en potencia acústica o mecánica, o viceversa.

**Umbral:** valor mínimo de una señal capaz de producir un determinado efecto.

## CONCLUSIONES

Espero que este trabajo haya servido para que el alumno, profesor o persona, puedan entender el proceso de una transmisión por fibra óptica.

Es imprescindible saber la importancia que tienen las comunicaciones, como ya se vio dentro de industrias de telecomunicaciones y otras ramas de ésta.

En la actualidad el avance tecnológico sobre todo en la telefonía y las computadoras nos ha permitido un enlace entre éstas. lo que nos exige una mayor velocidad en el envío de información vía telefónica, como cada día es mayor el número de personas que solicitan estos servicios el tráfico en las líneas telefónicas es mayor. por lo que la transmisión es cada vez mas lenta, esto lo podríamos solucionar utilizando fibra óptica, ya que es mayor el número de información que se puede transmitir por ella. entonces sí podríamos tener una mayor velocidad de información y una mejor calidad para poder navegar en Internet y también poder ver teleconferencias con una mayor nitidez y sin retraso de señal-voz.

Al concluir este estudio es recomendable que se actualice, ya que debido al gran avance tecnológico que cada día es mayor, surgen nuevos dispositivos, normas y recomendaciones, máquinas y accesorios que hacen mas rápido el proceso representando esto un mayor ahorro y un mejor aprovechamiento de la tecnología de las telecomunicaciones.

Como se vio a lo largo de este estudio, lo importante que resultan las telecomunicaciones, para una comunicación mayor y de mejor calidad dentro del mercado ya que debido a su gran velocidad, a desplazado al cable coaxial y al cable telefónico en algunas empresas obteniendo muy buenos resultados.

## BIBLIOGRAFIA

- I.- Fiber optics  
Robert J. Hoss  
Ed. Prentice Hall
- II.- Fiber optics communication  
Gerd Keiser  
Ed. McGraw-Hill
- III.- Fiber optics communication and other aplication  
Henry Zanger and Cynthia Zanger  
Ed. Maxwell Mc. Millan
- IV.- Digital transmission systems and network  
Michael J. Miller  
Ed. Computer science press
- V.- Introduction to optical fiber  
Allen Cherin  
Ed. McGraw-Hill
- VI.- Noice in digital optical transmission system  
Gunnar Jacobse  
Ed. Artech hose
- VII.- Fibras ópticas  
Gilberto Jardón Aguilar, Roberto Linares y Miranda  
Ed. C.E.C.S.A.
- VIII.- Comunicaciones y redes de procesamiento de datos  
Nestor González Sainz  
Ed. McGraw-Hill
- IX.- Introducción a las telecomunicaciones  
Enrique Herrera Pérez  
Ed. Limusa
- X.- Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas  
Jean Pierre Nerou  
Ed. Trillas