



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**FIBRAS OPTICAS Y SUS  
APLICACIONES.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N

JOSE ANTONIO BARRAGAN PEREZ  
JOSE ERNESTO LOPEZ ESPINOSA

MEXICO, D. F.

1984



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.

## I N D I C E

INTRODUCCION. . . . .	1
- Objetivo. . . . .	1
- Descripción general de las fibras ópticas . . . . .	1
CAPITULO I. RESEÑA HISTORICA . . . . .	6
- Invención y primeros usos . . . . .	6
- Estado actual . . . . .	16
CAPITULO II. CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS . . . . .	22
- Principio de la reflexión interna total . . . . .	22
- Optica geométrica de las fibras ópticas . . . . .	25
- Modos de propagación. . . . .	29
- Tipos de fibras ópticas . . . . .	30
- Dispersión. . . . .	33
- Dispersión de modo. . . . .	33
- Dispersión debida al material . . . . .	36
- Pérdidas. . . . .	38
- Atenuación en las fibras ópticas. . . . .	38
- Pérdidas por acoplamiento . . . . .	39
- Aspectos de la transmisión de imágenes. . . . .	45
- Efecto de borde en una fibra óptica . . . . .	45
- Tipos de flujo óptico en sistemas fibrosos. . . . .	48

- Efecto de los tres anillos . . . . .	54
- Transferencia de imágenes por medio de fibras ópticas . . . . .	60
<b>CAPITULO III. METODOS DE FABRICACION Y TIPOS DE CABLES</b>	<b>68</b>
- Método CVD (Deposición Química de Vapor) . . . . .	68
- Método DC (Doble Crisol) . . . . .	71
- Método ALPD (Deposición Axial y Lateral por medio de Plasma) . . . . .	74
- Método PCVD (Deposición Química de Vapor por Plasma) . . . . .	78
- Tipos de cables de fibras ópticas . . . . .	78
- Cables con protección estrecha para las fibras ópticas . . . . .	79
- Cable monofibra con protección estrecha . . . . .	80
- Cable compuesto . . . . .	80
- Cable de fibras ópticas con refuerzo de plástico (FRP) . . . . .	85
- Cable con gran número de fibras (protección estrecha) . . . . .	85
- Cables con protección holgada para las fibras ópticas . . . . .	85
- Cables de fibras ópticas en tubos . . . . .	85
- Cables sin partes metálicas . . . . .	89
- Cable con gran número de fibras (con protección holgada) . . . . .	90
- Cables de fibras ópticas en cintas . . . . .	92
- Cable de fibras ópticas en una estructura cilíndrica ranurada en V . . . . .	92

- Conectores. . . . . 94
- Conectores de guía metálica . . . . . 96
- Conectores con guía de presión. . . . . 96
- Conectores por medio de una esfera de alineamiento. 98
- Sistema para conexión de fibras ópticas por lentes  
esféricas . . . . . 98
- Emisores luminosos. . . . . 100
- Diodo emisor de luz (LED) . . . . . 102
- Láser semiconductor . . . . . 104
- Receptores ópticos. . . . . 109
- Fotodetector PIN. . . . . 109
- Fotodiodo de avalancha. . . . . 110

CAPITULO IV. APLICACIONES. . . . . 113

- Las fibras ópticas como medio para la transmisión -  
de imágenes . . . . . 113
- Aplicaciones de las fibras ópticas en medicina. . . 114
- Endoscopia técnica y holografía . . . . . 116
- Fibras ópticas en sistemas de comunicación. . . . . 121
- Aplicaciones de fibras ópticas en telefonía . . . . 121
- Aplicación de las fibras ópticas en la transmisión  
de datos. . . . . 129
- Aplicación de las fibras ópticas en la transmisión  
de vídeo. . . . . 132
- Aplicaciones de las fibras ópticas en sistemas eléc  
tricos de potencia. . . . . 139

- Aplicaciones de las fibras ópticas en instalaciones submarinas. . . . .	142
- Aplicación de fibras ópticas en un control automático de ferrocarril . . . . .	146
CAPITULO V. PERSPECTIVAS . . . . .	150
- Ventajas de las fibras ópticas. . . . .	150
- Comparación con otros sistemas de comunicación. . . . .	150
- Comparación con otros sistemas de comunicación en diferentes aplicaciones . . . . .	151
- Tendencias económicas de las fibras ópticas . . . . .	152
- Perspectivas de las fibras ópticas. . . . .	153
CONCLUSIONES. . . . .	157
BIBLIOGRAFIA. . . . .	162

## INTRODUCCION.

### OBJETIVO.

En los últimos años se ha destacado como uno de los más notorios logros tecnológicos el uso de las fibras ópticas, -- principalmente en el campo de las comunicaciones. Sin embargo su conocimiento y uso se ha restringido a un pequeño número de técnicos especializados.

La presente obra pretende apoyar el mejor conocimiento de las fibras ópticas y de sus aplicaciones. Intenta además mostrar las perspectivas de esta nueva rama de la tecnología.

Los fenómenos y dispositivos aquí descritos, son producto de las técnicas recientemente desarrolladas para conducir la luz eficientemente de un punto en el espacio a otro, a través de fibras dieléctricas transparentes.

Una aclaración conveniente es el hecho de que todo lo que aquí se presenta, procede de los trabajos de otros. Y estos trabajos son producto de las investigaciones en comunicaciones ópticas realizadas en los últimos veinte años.

Consideramos importante aclarar a los lectores de esta tesis que aun cuando la exposición pretende ser clara y completa, en algunos tópicos no se profundiza más allá de lo necesario, por cuestiones de espacio, o bien, para evitar complica-

ciones matemáticas que reduzcan la comprensión del texto.

Se concedió especial atención al aspecto ilustrativo, la mayoría de las figuras son dibujos muy sencillos, para ayudar al lector a visualizar aquello de que se está hablando. Estas ilustraciones están integradas al texto y contienen, varias de ellas, información adicional, por lo que deberán ser consultadas cada vez que se haga referencia a ellas.

Confiamos que esta obra cumpla con los objetivos establecidos, también esperamos que a los lectores de este trabajo les sea útil el mismo, y les sirva como iniciación a estudios o lecturas más avanzadas.

#### DESCRIPCION GENERAL DE LAS FIBRAS OPTICAS.

La utilización de la luz como una forma de comunicación es muy antigua, sin embargo, fue hasta el siglo XIX cuando esta idea empezó a despertar interés y a ser tratada con seriedad.

En 1880 Graham Bell demostró que la luz podía modularse y usarse como medio de comunicación, empero, las fuentes de luz con que se contaba no permitieron el desarrollo de este medio de comunicación por su incapacidad para transmitir luz en una sola frecuencia o en una sola dirección.

Con la aparición del láser, el sueño de utilizar la luz para la transmisión de información cobró nuevas esperanzas, pe-

ro al usar la luz láser como onda de radio el alcance es muy pequeño, debido a que, la gran cantidad de partículas presentes en el aire interactúan con la señal óptica absorbiendo la potencia de la luz. Esto es particularmente crítico en presencia de bruma, lluvia, etc. Por otro lado para salvar obstáculos materiales se requerían mecanismos de espejos para poder guiar la señal y ello involucra pérdidas.

Así, una vez que se contó con una fuente de luz apropiada, el problema consistió en encontrar un medio conveniente para transportar esta luz. Esta necesidad hizo volver la vista hacia las fibras de vidrio cuyos principios de operación eran ya conocidos.

Manojos de fibras de vidrio o plástico habían sido empleados para transmitir luz a cortas distancias, por ejemplo para iluminar un tablero de instrumentos o para la transmisión de imágenes, aplicación ésta que requiere de un alto poder resolutivo de las fibras (ejemplo de ello son los endoscopios).

Inicialmente la transparencia de estas fibras era insuficiente para la transmisión de luz a largas distancias, pero conforme alcanzaron un mayor grado de transparencia, sus aplicaciones en sistemas de comunicación aumentaron.

Una fibra óptica es una estructura por lo general de forma cilíndrica que consta de las siguientes regiones coaxiales:

El núcleo que es la sección central por donde se transmite la luz. El revestimiento es la capa que rodea al núcleo y actúa como reflector, confinando los rayos en el núcleo. La envoltura es una cubierta (plástica) protectora, que ayuda a mantener la fuerza de la fibra, a la vez que evita pérdidas, al disminuir el riesgo de daños mecánicos (rayaduras, desgastes, etc.) y protege contra la humedad a la fibra.

Las fibras ópticas presentan la mayor transparencia (menor atenuación), cuando la longitud de onda de la radiación transmitida a través de ella está en la región infrarroja del espectro electromagnético. Por lo cual al desarrollarse dispositivos opto-electrónicos semiconductores (LED y LÁSER), cuya emisión se ubica en la región infrarroja, se obtuvieron grandes avances en los sistemas de comunicación.

Para disminuir el efecto de la dispersión (ensanchamiento de los pulsos en su recorrido por la fibra, lo cual limita el ancho de banda), se desarrollaron dos tipos de fibras ópticas con características especiales en su índice de refracción: la fibra monomodo y la fibra de índice gradual.

Mediante el desarrollo de cables de fibras ópticas se han reducido considerablemente los riesgos en las fibras ocasionados por tensiones y deformaciones mecánicas.

El empleo de dispositivos láser de estado sólido en los -

sistemas de comunicación ha incrementado las aplicaciones de las fibras ópticas en telefonía, transmisión de datos, televisión por cable, etc.

## Capítulo I

### RESEÑA HISTORICA.

#### INVENCIÓN Y PRIMEROS USOS.

La idea de utilizar la luz como medio de comunicación no es reciente, pues ya los aborígenes americanos empleaban señales de humo y los ingleses hacían fogatas para avisar la aproximación de embarcaciones.

En la década de 1790 Claude Chappe construyó un sistema telegráfico óptico, el cual consistía de estaciones de semáforos colocados sobre lugares altos a lo largo de toda Francia. El sistema logró transmitir mensajes a distancias de 200 Km. en 15 minutos, dicho sistema permaneció en servicio hasta que fue sustituido por el telégrafo eléctrico.

En 1880 Alexander Graham Bell inventó el fonógrafo, con el cual demostró que el lenguaje podía ser transmitido sobre un rayo de luz. Bell enfocó un rayo de sol (angosto) sobre un espejo delgado. Las ondas producidas por la voz obligaban al espejo a vibrar, con lo cual la cantidad de energía luminosa -- transmitida al detector de selenio variaba correspondientemente. La luz que alcanzaba al detector hacía variar la resistencia del selenio y por consiguiente, también la intensidad de

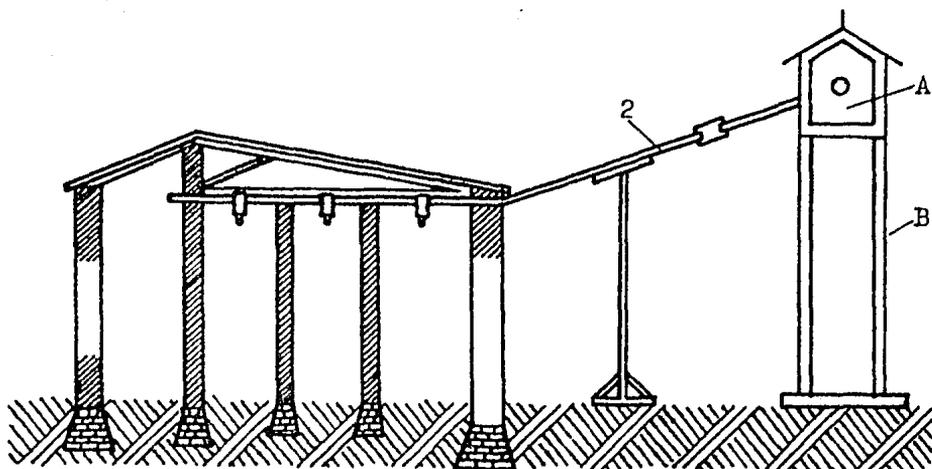
la corriente era modificada, consiguiéndose entonces reproducir la voz en el aparato receptor.

Durante la segunda guerra mundial era común que los barcos intercambiaran mensajes en clave morse con señales luminosas.

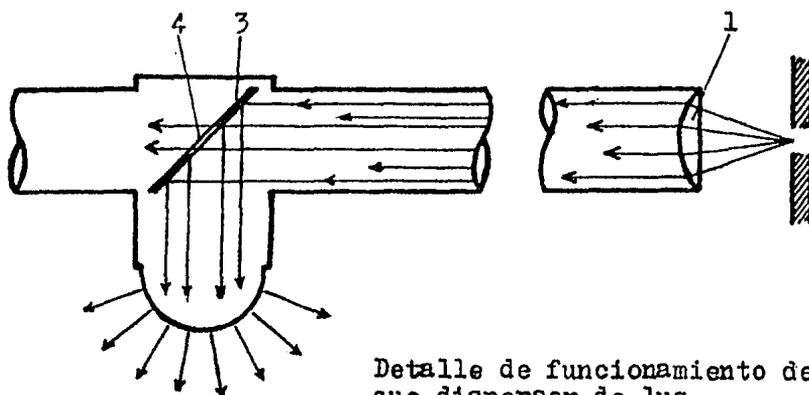
Así pues, la óptica de fibras no empezó su desarrollo en el vacío, la posibilidad de realizar dispositivos para la transmisión de luz a distancia por un canal recto o curvo fue planteada por primera vez por el ingeniero ruso V. N. Chikolev al rededor de 1860.

En 1876 se utilizó la transmisión de luz en guías para alumbrar los depósitos de una fábrica de pólvora de Ojtinsk, -- por medio de arcos de carbón ubicados fuera del local. Las guías de luz de Chikolev eran tubos metálicos huecos con superficie interna especular.

El rayo de luz se propagaba mediante reflexiones a lo largo de la guía, hasta alcanzar el extremo opuesto. Una fuente de luz con intensidad de unas 3000 candelas (Fig. I-1), colocada en un faro de vidrio A, en la torre B, que iluminaba los alrededores y el edificio. La luz era dirigida hacia el edificio mediante tres lentes convergentes 1, que enviaban la luz a través de tres tubos de hojalata 2. A lo largo del conducto la luz llegaba hasta el primer espejo 3, cuya capa plateada se depositaba tan sólo en la periferia de la lámina de vidrio



Estructura General



Detalle de funcionamiento del bloque dispersor de luz.

Fig. I-1. Estructura general y detalle de funcionamiento del bloque dispersor de luz del sistema ideado por Chikolev.  
 1) Lentes convergentes; 2) Guías de luz huecas; 3) Superficies especulares; 4) Vidrio transparente.

y reflejaba parte de la luz. Esta se dispersaba en el local - por medio de una semiesfera mate. Los rayos que pasaban a través del vidrio transparente 4, seguían por la guía de luz hasta el siguiente espejo.

En 1901 G. Ganneborg y en 1913 S. Bozhilov elaboraron dispositivos para la iluminación de sótanos, por medio de rayos solares concentrados, que se transmitían desde el tejado a través de un tubo con superficie interna especular (Fig. I-2). Los rayos solares después de reflejarse en el espejo 1, eran dirigidos hacia la guía de luz hueca de forma cónica 4, con el tubo central cilíndrico 9, y los espejos complementarios 8, que dirigían los rayos al tubo 5, la guía de luz cónica 4 concentra la radiación solar en la cara de entrada de la guía de luz hueca. Los rayos después de experimentar múltiples reflexiones llegan hasta la semiesfera mate 6, que ilumina el local.

Las pérdidas de luz en los conductos huecos se determinan fundamentalmente por el número de reflexiones que experimentan los rayos, por esta razón Chikolev trataba de disminuir el número de reflexiones de los rayos en las paredes de la guía de luz.

Utilizaba tubos de diámetros relativamente grandes y lentes de bajo poder. Lo voluminoso de las guías de luz huecas,

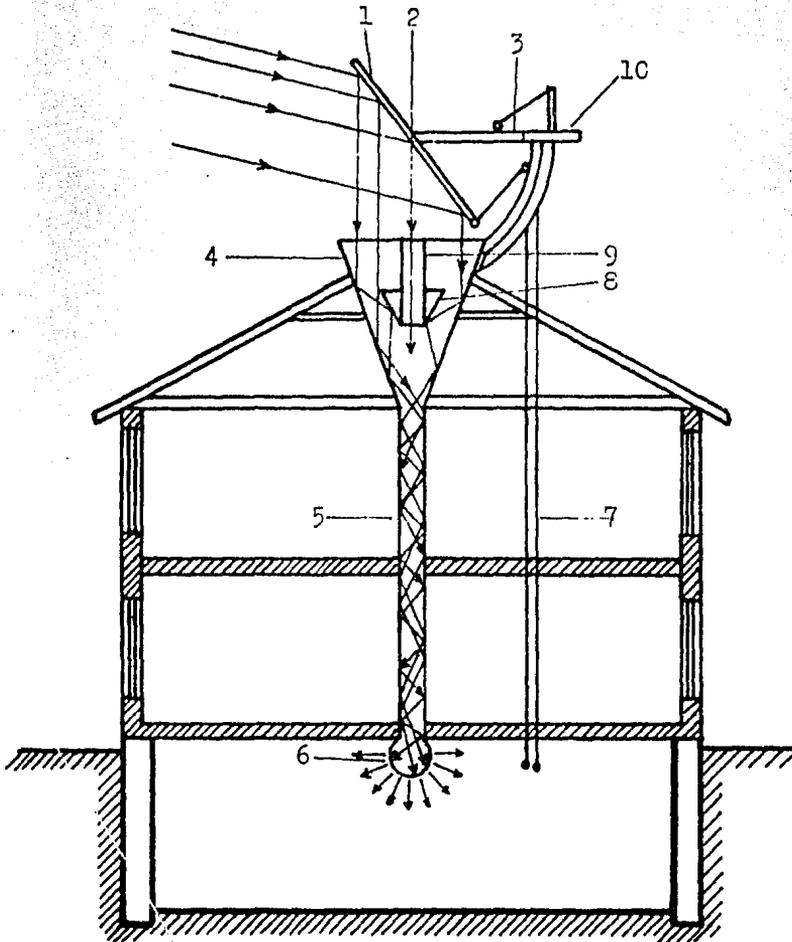


Fig. 1-2. Dispositivo para alumbrar sótanos con luz solar.  
 1) Espejo; 2) Eje de rotación del espejo; 3) Soporte para el espejo; 4), 8), 9) Sistema de la guía de luz cónica; 5) tubo  
 6) Semiesfera mate; 7) Cuerdas para guiar el espejo; 10) Eje de rotación del soporte.

la baja transparencia para rayos luminosos de gran abertura y las grandes superficies metálicas con altos índices de reflexión fueron la causa de la poca divulgación de las guías de luz de Chikolev.

La propagación de la luz por medio de reflexiones totales internas fue demostrada por Tyndall en la Real Sociedad de Inglaterra en 1870.

En su experimento (Fig. I-3), del grifo 3, colocado en la parte inferior del recipiente 4, el agua que llena el recipiente fluye en forma de chorro continuo 2, y no diverge en todo su recorrido hasta llegar a la vasija 1. En la pared del recipiente opuesta al grifo se coloca la lente 5, que enfoca el haz luminoso del arco de carbón 6, ubicado fuera del recipiente. La luz se propaga por el chorro de agua gracias a las múltiples reflexiones internas totales que experimentan los rayos en la frontera agua-aire.

En el chorro, aunque la luz viaja en línea recta se demuestra que puede ser conducida a lo largo de una trayectoria curva. Debido a la dispersión de la luz y a las irregularidades de la superficie del chorro, en los experimentos de Tyndall se destruye la condición para la reflexión interna total y el chorro se ilumina en toda su longitud. Este efecto es aplicado en la iluminación de las fuentes.

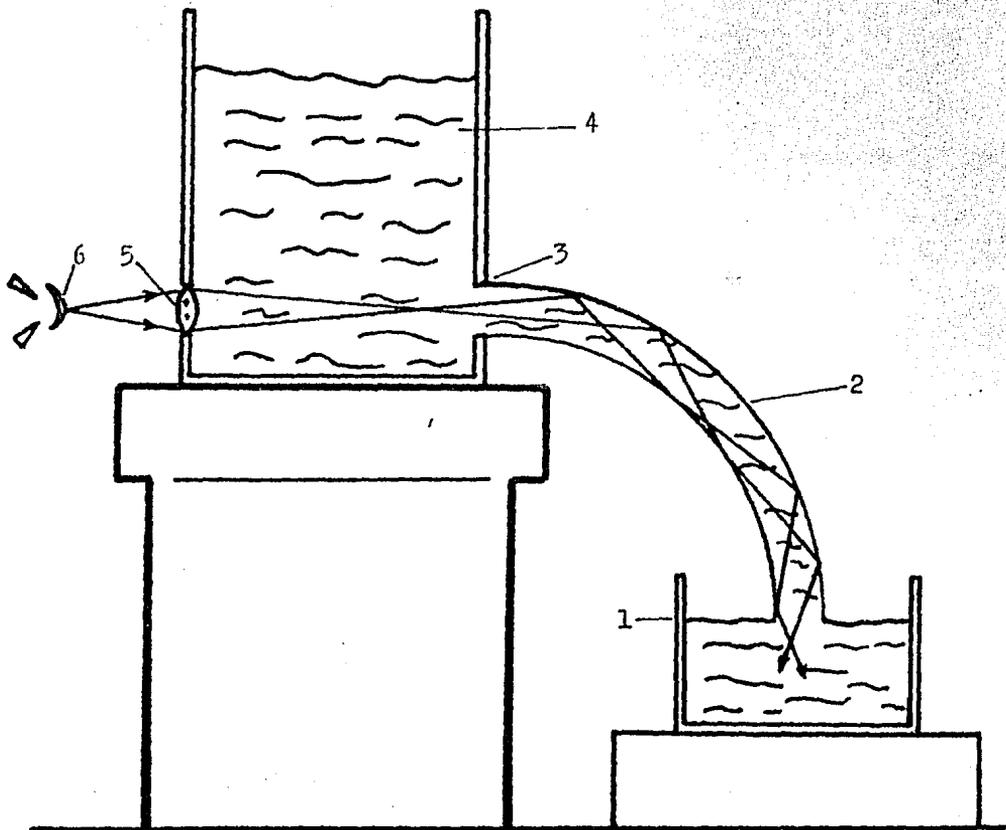


Fig. I-3. Esquema del experimento de Tyndall. Propagación de la luz por el chorro de agua.  
 1) Vasiija; 2) Chorro de agua; 3) Grifo; 4) Recipiente con -- agua; 5) Lentes; 6) Arco de Carbón.

En 1905 R. Wood escribe "es posible llevar la luz de un -- punto a otro sin grandes pérdidas de energía, utilizando la -- reflexión interna en las paredes de una barra de vidrio o mejor todavía cuarzo fundido".

A principios del presente siglo en Alemania se realizaron investigaciones sobre la propagación de ondas electromagnéticas a través de guías de luz transparentes. En 1920 O. Schriever hizo una síntesis de esos trabajos, analizando los resultados más importantes. W. Bragg escribió en 1931, que la propagación de la luz por medio de múltiples reflexiones totales internas en una barra de vidrio curvada, puede utilizarse como conducto para la transmisión del haz de luz que ilumina -- los objetos bajo el microscopio.

En 1936 el soviético A. Jalfin propuso el empleo de guías de luz curvadas de diámetro variable, para lograr una realización luminosa en un amplificador fotoeléctrico.

El fenómeno demostrado por Tyndall, las guías de luz empleadas por Chikolev y las guías de luz transparentes descritas por Wood, condujeron en 1927 a Braid en Inglaterra y a -- Hanzel en E.E.U.U. a la idea de utilizar un gran número de fibras en televisión para la transmisión y exploración de imágenes. La transmisión de una imagen con ayuda de un cordón de -- fibras colocadas regularmente, fue realizada por primera vez

en 1930, más tarde aparecieron las proposiciones de Goldsmith (1944), Reynen (1946), Jordan y Bell (1949) y otros científicos, referentes a la utilización de cordones de fibras de vidrio para la transformación de una imagen óptica.

Hasta el año de 1951 no se realizó ningún estudio en cuanto a la tecnología de la óptica de fibras. La única excepción la constituye el trabajo de Sawtter, quien trató en los años 1911-12 de obtener fibras compactas y delgadas de una barra y fibras capilares de tubos. La barra o el tubo se colgaba en el centro del horno y con ayuda de una pesa, sujeta al extremo inferior de dicha pieza, se estiraba la fibra. Para disminuir la velocidad de caída la pesa tenía forma de plato y se introducía en glicerina.

En 1951 Van Hill en Holanda y Kapany y Hopkins en Inglaterra, en forma independiente, empezaron trabajos para crear -- gastroscopios de fibras flexibles y a investigar las leyes de la transmisión de imágenes a través de haces regulares de fibras flexibles de vidrio.

La superficie lisa de una fibra debe mantenerse limpia de polvo, aceite, humedad, etc., si se desean evitar las fugas de luz (a través del mecanismo de reflexión total interna -- frustrada). Similarmente, si un gran número de fibras se empaquetan muy próximas entre sí, la luz se puede colar de una fibra

a otra en lo que se conoce como comunicación cruzada. Por estas razones se presentó la necesidad de un aislamiento luminoso de cada una de las fibras.

En 1953 Van Hill elaboró fibras de vidrio con una capa -- plástica aisladora de la luz. La idea de Van Hill, orientada a eliminar la filtración cruzada de la luz, consistía en aislar las fibras entre sí, recubriendo cada una de éstas con una capa delgada de un material transparente que tenía un índice de refracción menor que el del material de la fibra.

En 1958 y 59 esta idea fue perfeccionada por Kapany y Hirschowitz quienes elaboraron fibras de vidrio con una envoltura aisladora de luz también de vidrio, con un índice de refracción bajo. En estas fibras, las pérdidas de luz son menores -- que en las fibras con envoltura de plástico. La envoltura además protege la superficie pulida (refleitora) de la fibra contra la acción mecánica externa, puesto que para hacer mínimas las pérdidas de luz debidas a las múltiples reflexiones internas, las paredes laterales de cada fibra deben estar siempre lisas y limpias. El espesor mínimo necesario de la capa aisladora de luz es igual a la longitud de onda de la radiación transmitida, es decir, cerca de 0.5 - 1.0  $\mu\text{m}$ .

En los años 1959-61 Veinberg (soviético) y Kapany (norteamericano) elaboraron independientemente uno del otro una tec-

nología para la fabricación de un dispositivo que consistía - de cientos o miles de fibras (con un diámetro de aprox.  $2 \mu\text{m}$ ) cada una con su envoltura, las cuales eran fundidas juntas para dar lugar así a una multifibra, cuya resolución era aproximadamente de 250 líneas/mm.

En el desarrollo de la técnica de las guías de luz se han observado tres direcciones fundamentales.

1) Construcción de aparatos a base de las guías de luz huecas (guías de Chikolev), su desarrollo empezó aproximadamente a partir de 1870.

2) Las guías de luz monofilares transparentes sin recubrimiento, para la transmisión de radiación (empezaron a desarrollarse aproximadamente a partir de 1900).

3) La fibroóptica como un haz regular de guías de luz transparentes, donde cada una tiene su capa aisladora de luz (empezó a desarrollarse desde 1927 y su realización tecnológica empieza aproximadamente en 1960).

#### ESTADO ACTUAL.

La etapa moderna de la óptica de fibras puede considerarse a partir de 1960, año en que se realizan los primeros elementos de fibras con mejores características: transparencia a la luz, poder resolutivo, dimensiones adecuadas, para su utiliza

ción en la construcción de aparatos.

Actualmente se fabrica un gran número de piezas de fibras en países como: EU, Japón, Inglaterra, Italia, Francia, Hungría, R.F.A., R.D.A., Checoslovaquia y la U.R.S.S., los elementos fibrosos se emplean en la fabricación de aparatos médicos, en los instrumentos electrónico-ópticos, en los dispositivos de televisión y en dispositivos acústicos, en sistemas fototelegráficos, holográficos, telemétricos, óptico-mecánicos, cibernéticos, de láser, en investigaciones nucleares y aun en objetos ornamentales.

La construcción de aparatos a base de fibras ópticas exigió la elaboración de nuevos materiales ópticos. La complejidad de los problemas no solamente se debe a las dificultades en la fabricación de fibras altamente transparentes con aislamiento luminoso, sino también a la necesidad de su distribución en un espacio estrictamente restringido.

Se han investigado las leyes generales de propagación de la radiación a través de las guías de luz desde el punto de vista de la óptica geométrica. También se ha estudiado la teoría de la propagación de la luz en guías y las propiedades de los elementos de fibras: transmisibilidad luminosa, dispersión, poder resolutivo, características frecuencia-contraste, penetración de la radiación en la capa aisladora --

de las fibras y concentración de la radiación.

En el lapso 1961-65 se calcularon con ayuda de computadoras la transmisibilidad luminosa de las guías de luz rectilíneas, curvas y cónicas con caras rectas e inclinadas, en función de la abertura numérica de los haces luminosos y de las características de los materiales de la guía y de su revestimiento. Se ha demostrado que las pérdidas en las guías de luz en cada reflexión interna generalmente se encuentran entre -- los límites 0.0001 - 0.001 %.

A mediados de la década de 1960 se estudió "el efecto de los tres anillos", el cual revela las leyes de la propagación de la radiación y de la transmisión de imágenes a través del haz de guías de luz. El efecto de los tres anillos es la base de la óptica geométrica en el haz de guías de luz.

Los elementos de fibras para transmisión de imágenes realizados en los últimos diez años, son extraordinariamente variados: finísimas agujas para una micro-inyección luminosa de los elementos del núcleo de una célula viva, haces flexibles de fibras para endoscopios médicos y técnicos.

No todos los arreglos ópticos de fibras son flexibles, se han construido, por ejemplo, placas de fibras ordenadas, fundidas y rígidas llamados mosaicos, para reemplazar hojas de vidrio de baja resolución en tubos de rayos catódicos, vidico

nes, intensificadores de imágenes, etc. Mosaicos que consisten en literalmente millones de fibras con sus revestimientos metálicos fundidos entre sí, tienen propiedades mecánicas casi idénticas a las del vidrio homogéneo, lentes de fibras correctores de la curvatura de la imagen de los objetivos de espejos y lentes.

La aplicación de las fibras ópticas en medicina no sólo se reduce a los endoscopios (en su amplia variedad como son: gastroscopios, laringoscopios, bronquiscopios, rectoscopios, citoscopios, etc.), sino que también las encontramos en: sondas subcutáneas, en oxímetros encargados de registrar la concentración de oxígeno en la sangre, endoscopios para observar el corazón humano, en coaguladores que utilizan rayos láser para el tratamiento a distancia de los tejidos de los órganos internos y en las fibras de centelleo para la radiología.

Para mejorar la resolución de las fibras se desarrollaron diferentes técnicas como son: el escudriñamiento dinámico -- (consiste en mover los extremos de la fibra con una frecuencia de 4 o 5 veces por seg.) y el filtrado espacial que consiste en pasar la imagen a través de un patrón de delgadas películas de diferente grosor cada una de ellas.

El desarrollo de las fibras ópticas como medio de transmisión en sistemas de comunicación óptica, se inicia en la década

da de 1960. Son Kao y Hockham investigadores de los Standard Telecommunications Labs. quienes en 1966 determinaron que se podían producir fibras de vidrio, guidoras de luz, con atenuaciones suficientemente bajas, para emplearse en comunicaciones a grandes distancias (en aquella época se manejaban atenuaciones mayores de 1000 dB/Km).

En 1970 Keek y Maurer de Corning Glass Works, fabricaron fibras con atenuación de 20 dB/Km y actualmente se producen fibras con una atenuación de 0.15 dB/Km.

El vidrio empleado en la fabricación de las fibras presenta mayor transparencia (menor atenuación), cuando la longitud de onda de la radiación transmitida, pertenece a la región infrarroja del espectro electromagnético. Lo cual ha obligado al desarrollo de emisores (LED y láser semiconductor) que radian con longitudes de onda de  $0.85\ \mu\text{m}$  y  $1.3\ \mu\text{m}$ .

También se han investigado fotodetectores sensibles a tales frecuencias (PIN y de avalancha).

El primer tipo de fibra empleada fue la de índice escalonado. Con el fin de disminuir la dispersión se desarrollaron las fibras de índice gradual (Nippon Sheet, Glass Co. Ltd.) y la fibra monomodal que todavía se encuentra en estudio.

Con la finalidad de proteger a las fibras ópticas se han desarrollado diferentes tipos de cables. Los cuales se dise-

nan en función de las condiciones del tendido y de las características ambientales del lugar.

Actualmente dos ciudades del edo. de Virginia EU, distantes 8 Km una de la otra, se encuentran unidas por un enlace telefónico, que consta de un cable con 6 fibras y un equipo terminal con 4 tableros de distribución y multiplexores digitales capaces de transmitir 45 Mb. Los transmisores de este sistema son láseres de arseniuro de galio y aluminio, en tanto que -- los receptores son fotodiodos de avalancha, su capacidad de -- transmisión es equivalente a la de un circuito convencional -- de cable con 92 pares telefónicos.

## Capítulo II

### CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

La fibra óptica opera como una línea de transmisión para las partes infrarroja y visible del espectro electromagnético.

En su forma más sencilla una fibra óptica consta de una parte central llamada núcleo, región por la que se transmite la luz, rodeado por una capa de material de índice de refracción más bajo, el cual recibe el nombre de revestimiento.

#### PRINCIPIO DE LA REFLEXION INTERNA TOTAL.

El mecanismo básico de la transmisión de la luz a través de la fibra es la reflexión interna total, que se presenta cuando el haz luminoso pasa de un medio con un índice de refracción dado a otro de índice de refracción menor.

La razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en un medio dado, se conoce como índice de refracción.

$$n = \text{índice de refracción} = \frac{\text{vel. de la luz en el vacío (c)}}{\text{vel. de la luz en el medio (v)}}$$

Cuando incide un rayo de luz en la frontera de separación de dos medios, la energía luminosa se divide, una parte se re

fleja, mientras que la otra se refracta y penetra a través de la frontera, en el segundo medio.

Se presentan dos casos de reflexión y refracción.

El primer caso se produce cuando la luz viaja del medio de índice de refracción menor, al medio de mayor índice. (del aire al vidrio), ver Fig. II-1. Se tiene que  $n_A < n_V$  y de acuerdo con la ley de Snell:  $\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{n_V}{n_A}$ , se tiene entonces:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{n_V}{n_A} > 1 \quad \text{o} \quad \text{sen } \theta_i > \text{sen } \theta_r \quad \text{y} \quad \theta_i > \theta_r$$

La parte de luz reflejada crece en proporción directa al ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ). Mientras tanto, con respecto a la parte de luz refractada, ésta sigue presente aún para ángulos de incidencia cercanos a  $90^\circ$ .

El otro caso de reflexión se presenta cuando la luz pasa del medio de mayor índice de refracción al medio de índice menor. Entonces  $n_V > n_A$  (Fig. II-2), así, la ley de Snell queda;

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{n_A}{n_V} < 1 \quad \text{o} \quad \text{sen } \theta_i < \text{sen } \theta_r \quad \text{y} \quad \theta_r > \theta_i$$

Así, existe un ángulo de incidencia  $\theta_i$  (donde  $\theta_i < 90^\circ$ ), para el cual el ángulo formado por el rayo refractado  $\theta_r$  sea igual a  $90^\circ$ , a este ángulo de incidencia se le llama ángulo crítico  $\theta_c$ . Y se determina por la ley de Snell.

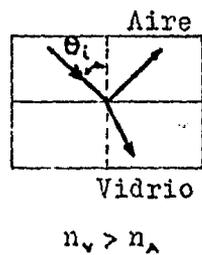
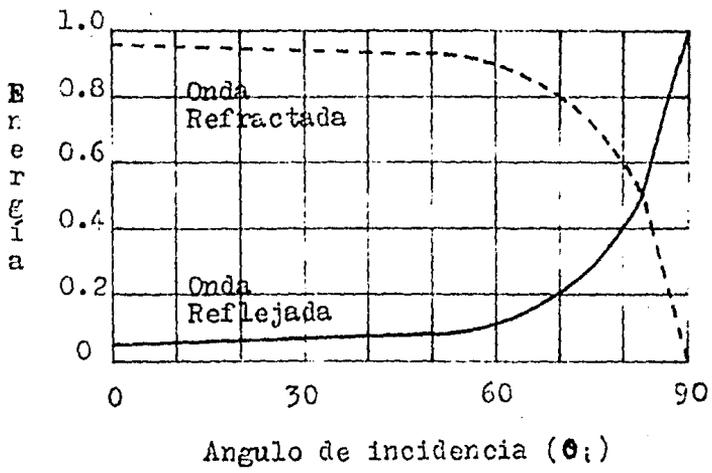


Fig. II-1. Energía reflejada y refractada contra el ángulo de incidencia, cuando la onda incidente en el aire pasa al vidrio.

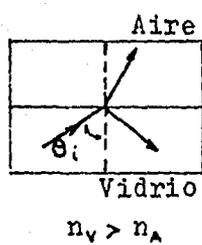
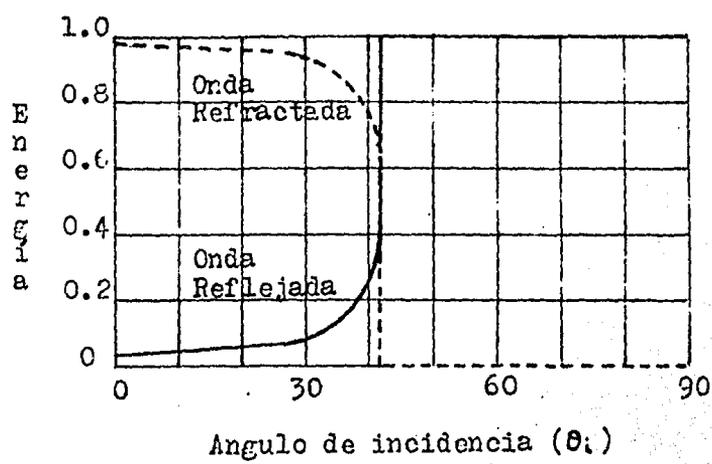


Fig. II-2. Energía reflejada y refractada contra el ángulo de incidencia, cuando la onda incidente en el vidrio pasa al aire, presentando reflexión total interna.

Se tiene que  $\theta_t = 90^\circ$  y  $\theta_i = \theta_c$ .

La ley de Snell  $\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_t} = \frac{n_2}{n_1}$ , queda:  $\frac{\text{sen } \theta_c}{\text{sen } 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ .

Así  $\theta_c = \text{ang sen } \frac{n_2}{n_1}$ .

La luz reflejada aumenta al crecer el ángulo de incidencia y a partir de cierto ángulo  $\theta_c$  (ángulo crítico), toda la energía se refleja. Por lo cual para  $\theta_i > \theta_c$  no hay luz refractada y se dice que se produce una reflexión interna total.

Sin embargo, existe una onda que se propaga en el segundo medio, paralelamente a la superficie, pero la amplitud de ésta decrece rápidamente a medida que se interna en el segundo medio, esta onda se denomina evanescente.

Lo anterior se ilustra en la Fig. II-3.

#### OPTICA GEOMETRICA DE LAS FIBRAS OPTICAS.

En la Fig. II-4, se muestra el esquema de una fibra óptica de índice escalonado, la cual presenta un núcleo con índice de refracción constante  $n_1$  y un revestimiento con índice de refracción  $n_2$ , menor que el del núcleo.

La luz que viajando por el núcleo incide en la frontera de éste y el revestimiento, será internamente reflejado siempre que el ángulo de incidencia en cada reflexión sea mayor que -

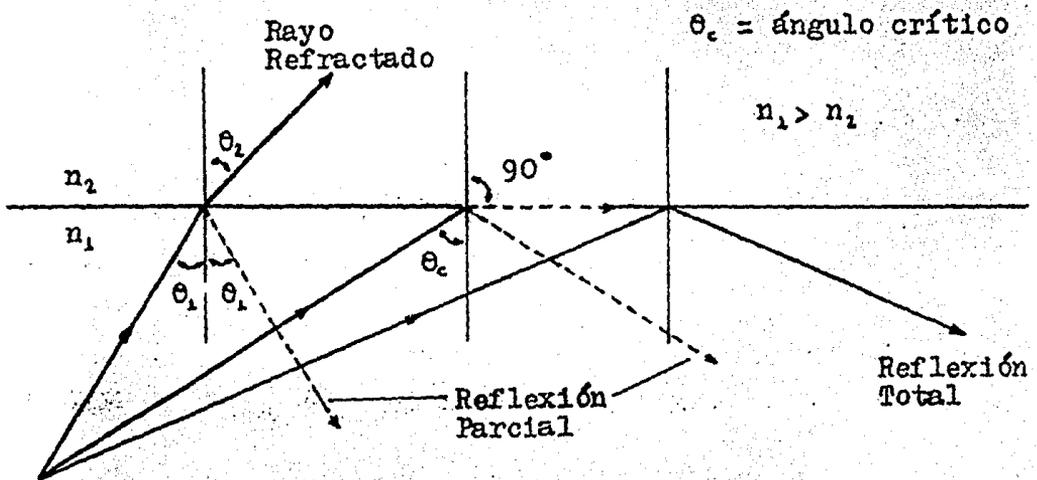
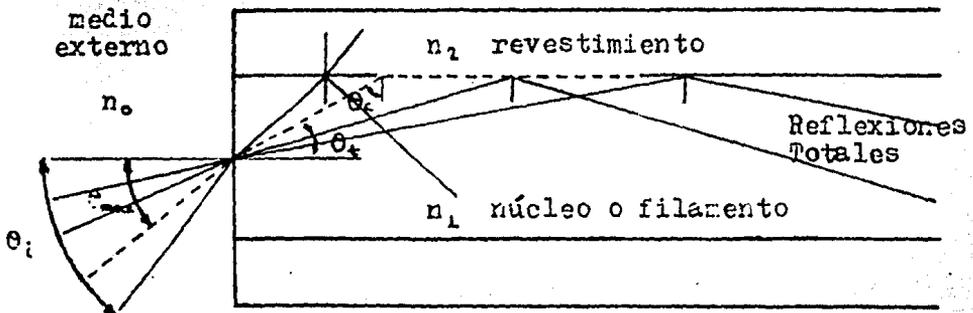


Fig. II-3. Los rayos se propagan por el medio de mayor índice de refracción e inciden en la frontera de un medio de menor índice de refracción.



$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \text{ para } n_2 < n_1$$

Fig. II-4. Reflexión interna total.

el ángulo crítico.

De la misma Fig. II-4 se ve que existe un valor máximo  $\theta_{max}$  del ángulo de incidencia  $\theta_i$  (de los rayos de luz que pegan en la cara de la fibra), para el cual el rayo que penetra, llegará a la frontera núcleo-revestimiento con el ángulo crítico  $\theta_c$ . Los rayos incidentes en la cara de la fibra con ángulos mayores que  $\theta_{max}$ , pegarán en la pared interior con ángulos menores que  $\theta_c$ . Ellos se reflejarán sólo parcialmente en cada encuentro con la interfase núcleo-revestimiento y rápidamente serán absorbidos.

Así,  $\theta_{max}$  representa el ángulo máximo con respecto al eje de la fibra, con el que puede incidir un rayo de luz en la cara de la fibra (específicamente en el núcleo), para que pueda ser transmitido por múltiples reflexiones a lo largo de la fibra.

De esta manera  $\theta_{max}$  define el semiángulo del cono de aceptación de la fibra. Este representa la región para la cual todos los rayos de luz que estén en ella serán transmitidos a través de la fibra. Se determina de la siguiente forma.

$$n_0 \text{ sen } \theta_{max} = n_1 \text{ sen } \theta_c = n_1 \text{ sen } (90^\circ - \theta_c)$$

$$n_0 \text{ sen } \theta_{max} = n_1 \text{ cos } \theta_c$$

$$n_0 \text{ sen } \theta_{max} = n_1 (1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{1/2}$$

teniendo en cuenta que  $\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

$$n_o \text{ sen } \theta_{\max} = n_1 \left(1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right)^{1/2}$$

$$n_o \text{ sen } \theta_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

$$\theta_{\max} = \text{ang sen } \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_o}$$

La cantidad  $\text{sen } \theta_{\max}$  se define como la abertura numérica, abreviada como A. N. La abertura numérica representa el poder que tiene la fibra para recolectar la luz.

$$\text{A. N.} = \text{sen } \theta_{\max} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_o}$$

#### MODOS DE PROPAGACION.

Por la forma de propagación de los rayos luminosos dentro de la fibra, éstos se clasifican en:

Meridionales, que son rayos de luz que pasan a través del eje de la fibra mientras son reflejados internamente y cuya propagación está confinada en un plano. Los rayos de luz que se propagan con ángulos pequeños respecto al eje de la fibra, son llamados modos de propagación de bajo orden, mientras que los que se difunden con ángulos mayores se conocen como modos de propagación de alto orden, estos últimos presentan un número

ro mayor de reflexiones al transmitirse por la fibra. Los modos de propagación no dependen de la longitud de onda de la señal transmitida.

Los rayos axiales (se transmiten a lo largo del eje, sin reflejarse), forman parte de los rayos meridionales.

Rayos Oblicuos. Rayos de luz cuya propagación no está confinada a un plano, no pasan a través del eje de la fibra. Siguen una trayectoria helicoidal poligonal, la cual puede ser de mano izquierda o de mano derecha.

#### TIPOS DE FIBRAS OPTICAS.

##### Fibras ópticas de índice de refracción constante.

Este tipo de fibra consta básicamente de un núcleo con índice de refracción uniforme, mientras que el revestimiento es de un material de índice de refracción menor que el del núcleo (Fig. II-5).

La reflexión no ocurre exactamente sobre la frontera, sino que el rayo de luz penetra una distancia mínima sobre el revestimiento, presentando ciertas pérdidas (las cuales se observan como un tenue halo en la fibra).

Este tipo de fibra por lo general presenta una gran abertura numérica.

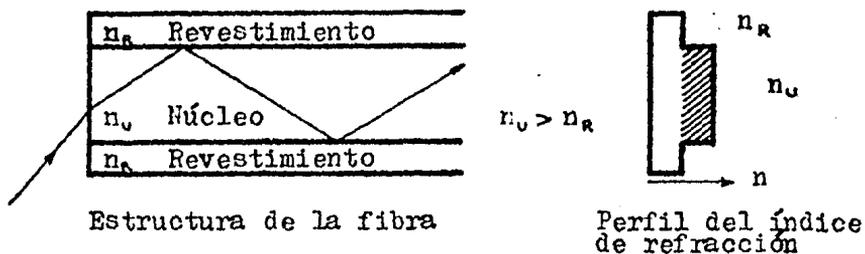


Fig. II-5. Fibra de índice constante.

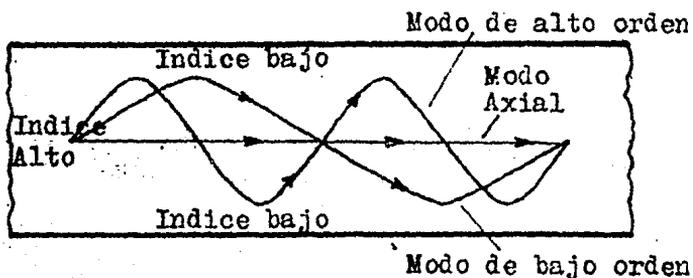
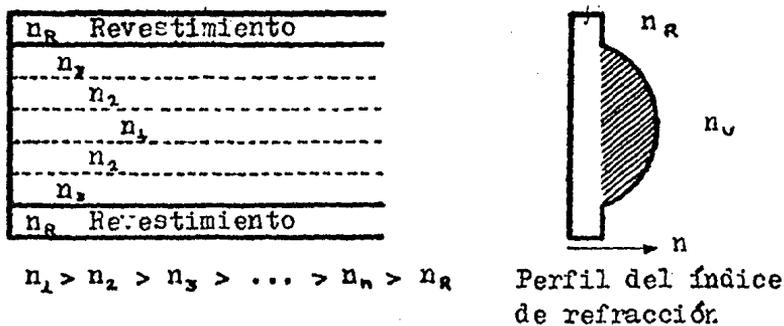


Fig. II-6. Fibra de índice gradual.

En su fabricación se emplea principalmente el método llamado de crisol doble. Ver el Cap. III.

Su empleo se ubica primordialmente en enlaces de corta distancia y donde no se requiera un gran ancho de banda (transmisión de datos, video, etc.). Presenta bajas pérdidas por acoplamiento.

Las características típicas de este tipo de fibra se presentan en la Tabla II-1.

#### Fibras ópticas de índice de refracción gradual.

En este tipo de fibra el índice de refracción en el núcleo decrece en forma radial, desde el centro del núcleo hasta el revestimiento. Ver la Fig. II-6.

Los modos de transmisión de alto orden recorren largas trayectorias, pero lo hacen más rápido que los modos de propagación de bajo orden o aun los rayos axiales que viajan a través de una región con índice de refracción mayor.

Por lo anterior la dispersión modal es muy baja. Pero las pérdidas por acoplamiento son altas.

En su fabricación se emplea principalmente el método CVD (Chemical Vapor Deposition), ver Cap. III.

Se emplea preferentemente en enlaces de larga distancia que requieran de gran ancho de banda (telefonía). Este tipo

de fibra resulta más costosa que la fibra de índice constante.

Las características de este tipo de fibra se presentan en la Tabla II-1.

#### DISPERSION.

La limitación en el ancho de banda (la cantidad de pulsos que pueden transmitirse por unidad de tiempo), en parte se debe al fenómeno conocido como dispersión, la cual se divide en dispersión de modo y dispersión debida al material.

#### Dispersión de Modo.

En una fibra la luz se propaga en miles de modos diferentes. Los rayos de luz que se transmiten en forma casi paralela al eje de la fibra, recorrerán una distancia menor que aquellos que entran a la fibra con un determinado ángulo con respecto al eje, que los obliga a transmitirse mediante múltiples reflexiones.

Por lo cual un pulso de luz, compuesto de múltiples rayos (originados simultáneamente), sufrirá cierto defasamiento o dispersión en su trayecto a través de la fibra, lo anterior se manifestará en el tiempo de llegada de los diferentes rayos.

Para reducir la dispersión en fibras con índice de refracción constante en el núcleo, se requiere disminuir la A. N. de la fibra.

En las fibras con índice de refracción gradual en el núcleo, donde el índice decrece en forma radial del centro hacia afuera del núcleo de la fibra y puesto que la luz viaja más rápido en las regiones de índice de refracción más bajo, se puede conseguir que todos los rayos lleguen a su destino casi simultáneamente.

La Fig. II-7 muestra como la dispersión limita la cantidad de pulsos y por tanto la capacidad de la fibra óptica.

La razón de pulsos que deben transmitirse se obtiene de las mediciones experimentales hechas sobre los pulsos de entrada y de salida.

Ejemplo; para la fibra con índice uniforme, se observa que la magnitud en tiempo del pulso de salida es de 50 ns, éste debe ser el intervalo mínimo entre dos pulsos consecutivos de la señal de entrada. El número de pulsos por segundo que pueden transmitirse es el inverso de dicho tiempo.

$$\frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} = \frac{1}{50 \times 10^{-9} \text{ seg}} = 2 \times 10^7 \text{ (pulsos/seg)}$$

Las fibras con índice graduado presentan una dispersión de modo casi 25 veces menor que la de la fibra de índice constante.

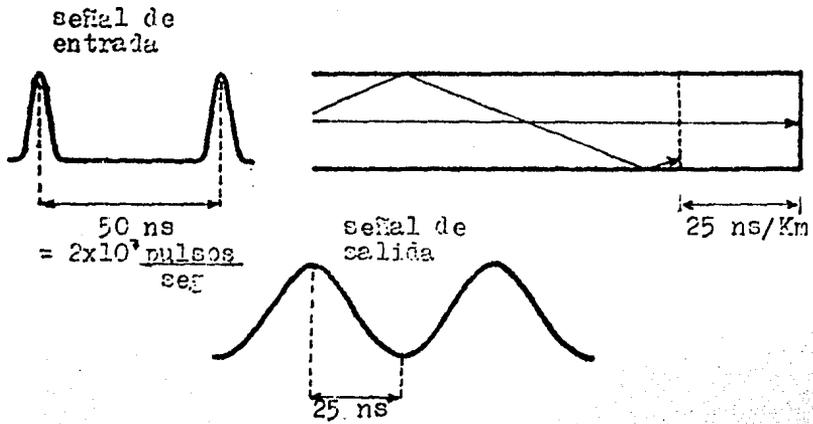


Fig. II-7. Fibra con índice constante.

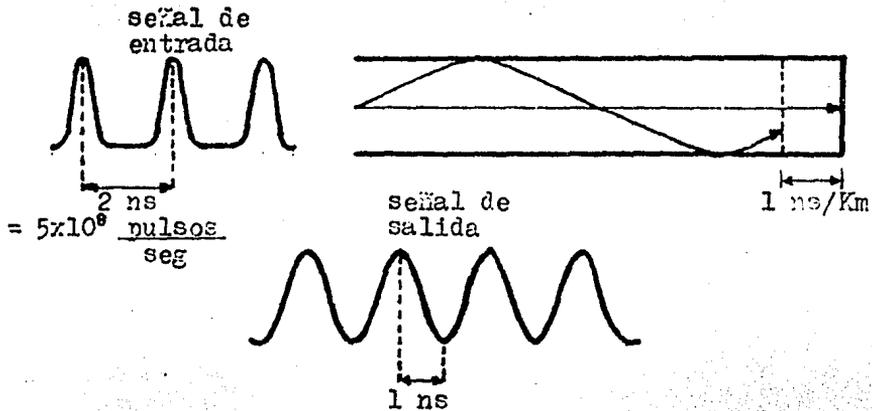


Fig. II-7. Fibra con índice gradual.

En las fibras monomodales (donde la propagación tiene lugar casi exclusivamente en un solo modo), la dispersión de modo es despreciable. Con un núcleo de 4 a 12  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Dispersión debida al material.

El índice de refracción en la fibra varía por efecto de la longitud de onda de la señal luminosa transmitida a través de ésta ( $n$  aumenta con la frecuencia), por lo cual los rayos de diferente longitud de onda se transmiten a través de la fibra con velocidades ligeramente diferentes.

Resumiendo, el ancho de los pulsos en una guía de luz, depende directamente del ancho del espectro transmitido.

Dos clases de fuentes luminosas están actualmente en servicio. El diodo luminiscente o LED cuyo ancho espectral es de  $\sim 350 \text{ \AA}$  y un láser semiconductor (de arseniuro de galio) con un espectro de sólo  $20 \text{ \AA}$  de ancho.

En la Fig. II-8 se ve que usando un láser como fuente emisora, se puede transmitir una mayor cantidad de pulsos que empleando un LED.

En ambos casos la transmisión se efectúa a través de una fibra de índice gradual. Lo anterior se debe al hecho de que la dispersión en tiempo de un pulso del láser es apenas de  $\sim 0.2 \text{ ns/Km}$ , mientras que para el LED, la dispersión es casi 20

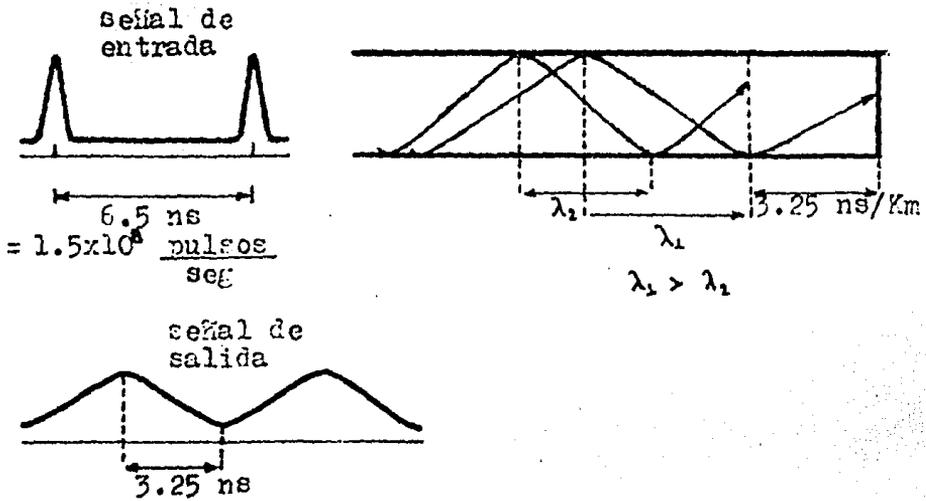


Fig. II-8. LED como fuente luminosa con un ancho de banda de 350 Å.

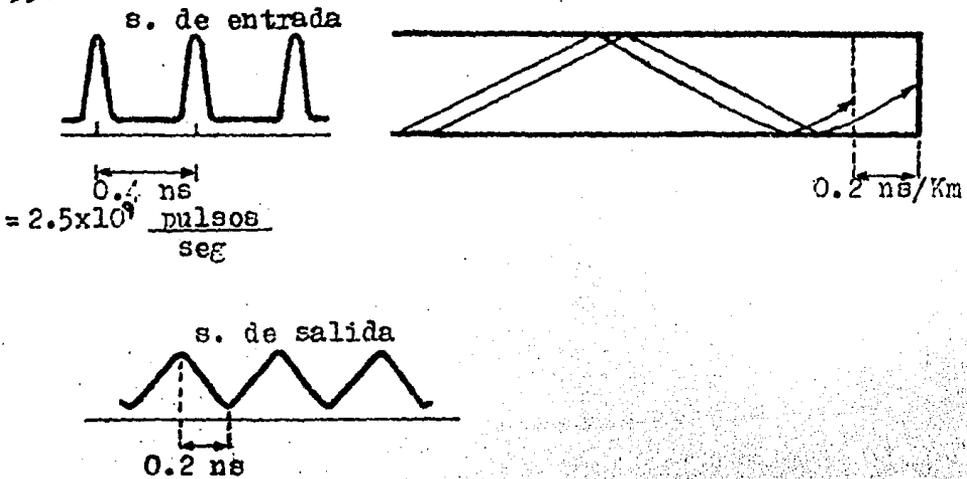


Fig. II-8. Láser como fuente luminosa con un ancho de banda de 20 Å.

veces mayor que con un láser.

## PERDIDAS.

### Atenuación en las Fibras Ópticas.

La premisa más importante para la comunicación óptica es - poder disponer de un material para la fabricación de las fibras ópticas, que presente baja atenuación para la transmisión de luz.

Hasta 1970 los vidrios de que se disponía presentaban atenuaciones mayores a 20 dB/Km. Con la técnica actual se consiguen valores de atenuación menores de 5 dB/Km (fibras monomodales y fibras de índice gradual presentan atenuaciones menores a 1 dB/Km, para una longitud de onda de 1.3  $\mu\text{m}$ ).

La atenuación en las fibras ópticas se debe a:

a) La difusión. Por difusión se entiende que la luz es esparcida o desviada de la dirección deseada. La difusión de Rayleigh tiene lugar desde centros de difusión de las mismas dimensiones que la longitud de onda luminosa y depende de variaciones locales, difíciles de evitar en la composición del vidrio. La difusión de Rayleigh decrece en función de la longitud de onda proporcionalmente a  $\lambda^{-4}$ .

La difusión independiente de la longitud de onda tiene lu-

gar por inhomogeneidades de mayores dimensiones que la longitud de onda luminosa, por ejemplo burbujas de aire, y por efecto de tensiones mecánicas.

b) Por absorción. La luz es absorbida en el vidrio, principalmente por iones de impurezas, convirtiéndose en calor. Los iones  $\text{OH}^-$  de agua, presentes en el vidrio, presentan máxima absorción en 950 y 1400 nm (y a otras longitudes de onda).

Los iones de ciertos metales, hierro, cobre, cromo, manganeso, níquel y cobalto, dan absorciones muy diferentes según sea la longitud de la onda luminosa y la composición del vidrio. Incluso porcentajes tan bajos como 10 milésimas de millón de impurezas pueden dar atenuaciones adicionales de -- 1 dB/Km.

c) Irregularidades en la interfase núcleo-revestimiento.

d) Microcurvaturas o pequeños dobleces en la fibra, debidos a la estructura del cable o a la instalación de éste.

En la Fig. II-9 se observa la atenuación que presentan ambos tipos de fibras, para diferentes longitudes de onda.

#### Pérdidas por acoplamiento.

Este tipo de pérdidas produce atenuaciones que son independientes de las características de las fibras ópticas y dependen del diseño del conector y de los métodos de alineamiento

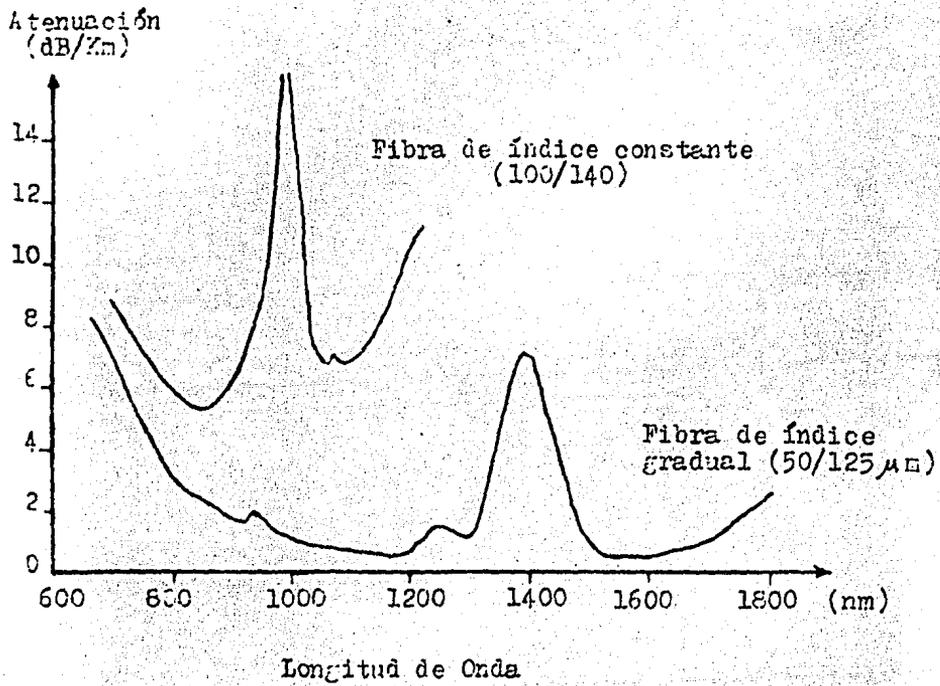


Fig. II-9. Curvas de atenuación en fibras ópticas.

en los empalmes.

Una fuente de pérdida es la separación entre los extremos de las fibras, cuando se realiza una interconexión, ésta atenuación se debe a la presencia de una interfase de aire entre ambos extremos, a este tipo de pérdidas se les conoce como - pérdidas de Fresnel, éstas ocurren cuando un rayo pasa de un medio a otro con índice de refracción diferente. Parte del - flujo es reflejado.

Estas pérdidas se calculan por la fórmula siguiente.

$$\text{Pérdidas de Fresnel} = 10 \log \frac{2 + \frac{n_x}{n_y} + \frac{n_y}{n_x}}{4}$$

donde:  $n_x$  = índice de refracción del medio x  
 $n_y$  = índice de refracción del medio y

Estas reflexiones causan atenuaciones de aproximadamente - 0.34 dB.

La Fig. II-10 muestra los efectos de las pérdidas de Fresnel en el cálculo de la A. N. en la conexión entre la fuente emisora y la fibra.

$$A. N. = n_o \text{ sen } \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

$$n_e \text{ sen } \theta_e = n_o \text{ sen } \theta_a = A. N.$$

$$\text{sen } \theta_e = \frac{A. N.}{n_e} \quad (\text{independiente de } n_o)$$

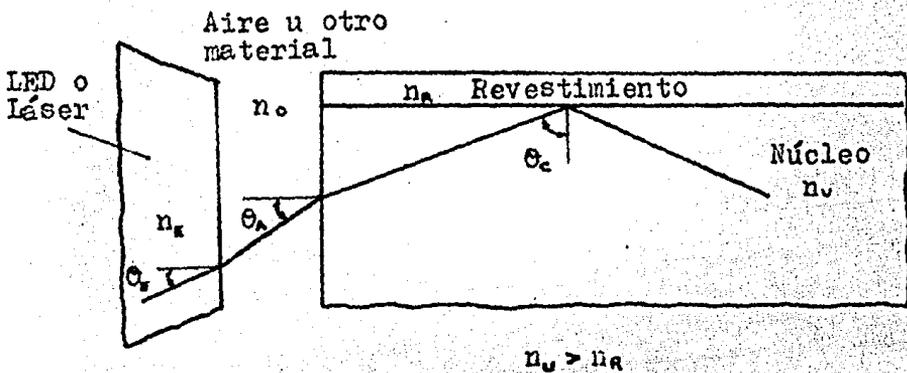


Fig. II-10. Pérdidas de Fresnel.

Las fuentes emisoras como el LED y el láser están generalmente compuestas de arseniuro de galio o de sustancias similares con un índice de refracción alto (aproximadamente de 3.6), con índices tan altos, es conveniente el uso de un cemento epoxyco, el cual reduce las pérdidas de acoplamiento. Lo mismo se aplica para las uniones entre fibras.

INDICE	DIAM. NUCLEO ( $\mu\text{m}$ )	DIAM. REVEST. ( $\mu\text{m}$ )	TIPO	LONG. DE ONDA ( $\mu\text{m}$ )	ATEN. (dB/Km)	APLIC.	A. N.
ESCALO NADO Silicio	100	140	Multi modal	0.85 1.3	5	Trans. de datos TV	C.29
ESCALO NADO Silicio	4 a 12	125	Mono-modal	0.85 1.3	4 1	Telecomunicaciones	
ESCALO NADO Plástico			Multi modal	Visible	Alta	Medicina	0.5
ESCALO NADO Silicio	200		Multi modal	0.85	Baja	Usos Militares	0.27
GRA-DUAL Silicio	50	125	Multi modal	0.85 1.3	2.4 0.7	Telecomunicaciones	0.2

Tabla II-1. Características de las Fibras Ópticas.

## ASPECTOS DE LA TRANSMISION DE IMAGENES.

Si el haz cónico de rayos que incide sobre la cara de entrada del núcleo, tiene en el vértice un ángulo de apertura  $\theta_i < \theta_{max}$ , puede pasar totalmente a través del núcleo, es decir, su transmisibilidad  $\gamma_i$  es igual a 1.

Si en cambio,  $\theta_i > \theta_{max}$ , la transmisibilidad  $\gamma_i$  del haz cónico de los rayos por la fibra, se determina por la expresión:

$$\gamma_i = \frac{\text{sen}^2 \theta_{max}}{\text{sen}^2 \theta_i}$$

puesto que  $\theta_i > \theta_{max}$ , entonces  $\gamma_i < 1$ .

El coeficiente  $\gamma_i$  se suele llamar la transmisibilidad geométrica de la fibra óptica y determina el coeficiente de transmisibilidad del flujo útil a través de un núcleo conductor de luz.

## EFEECTO DE BORDE EN UNA FIBRA OPTICA.

Aunque  $\theta_{max}$  es el ángulo máximo para el cual todos los rayos que inciden en la cara de entrada de la fibra se propagan en ésta debido a la reflexión total interna en la frontera núcleo-revestimiento, estrictamente este ángulo corresponde a la abertura nominal de los rayos meridionales, es decir, de los rayos que cortan al eje de la fibra. Para un mismo ángulo de inclinación  $\theta_i$ , los rayos desviados en la entrada de la fi

bra óptica, es decir, los que no cortan el eje de ésta, inciden sobre la superficie lateral de la fibra óptica, formando un ángulo mayor que los meridionales. Esto produce que para ángulos  $\theta_i > \theta_{max}$ , cuando los rayos meridionales ya no se propagan en la fibra, una parte de los rayos desviados, los que inciden en el borde (anillo periférico) de la cara de entrada de la fibra óptica, encuentran la superficie lateral bajo el ángulo de reflexión total interna y se propagan por la fibra. Por ello el nombre de efecto de borde.

Los rayos desviados se propagan dentro de la fibra siguiendo una línea helicoidal quebrada, y de todo el conjunto de los rayos que inciden en la cara de entrada de la fibra óptica, la mitad describe en su propagación una línea helicoidal quebrada con giro a la izquierda, y la otra con giro a la derecha. En la Fig. II-11, se muestra la proyección de los rayos desviados sobre la sección transversal de la fibra óptica, en ésta, el diámetro  $l$  del cilindro tangente al rayo dado, durante toda la propagación de éste, permanece constante.

El ángulo de incidencia  $\theta_i$  de los rayos en la cara de entrada de la fibra, para el cual éstos alcanzan la frontera núcleo-revestimiento bajo el ángulo de reflexión total interna, se determina por la expresión:

$$\text{sen } \theta_i = \left( 1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)^{1/2}$$

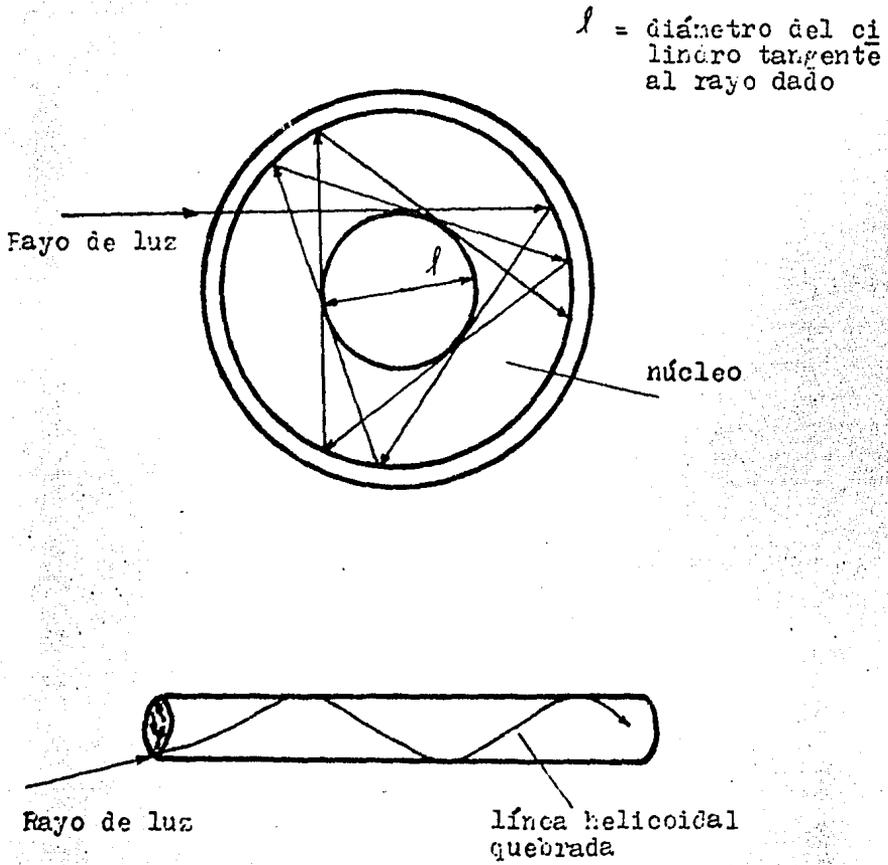


Fig. II-11. Trayectoria de los rayos en una guía de luz.

donde  $D_c$  es el diámetro del núcleo.

#### TIPOS DE FLUJO OPTICO EN SISTEMAS FIBROSOS.

Los elementos fibrosos utilizados en la construcción de aparatos, generalmente están formados por un conjunto de filamentos conductores de luz (núcleos), separados por capas aisladoras de luz.

Al incidir un flujo  $\Psi$ , sobre la cara de entrada de la pieza, lo hace sobre las caras tanto de los núcleos como de las capas intercaladas entre éstos.

Si el flujo tiene una abertura  $\theta_i > \theta_{max}$ , la parte contenida en el ángulo de abertura  $0^\circ$  a  $\theta_{max}$ , se propaga a través del núcleo, mientras que los rayos que tienen un ángulo de inclinación mayor que  $\theta_{max}$ , forman un flujo fuera de abertura.

Así el flujo  $\Psi$  en la cara de entrada del haz de fibras se divide en tres componentes:  $\Psi_n$  es el flujo útil con abertura  $\theta_{max}$ , el cual se propaga a través del núcleo conductor de luz y lleva la información útil;  $\Psi_b$ , el flujo fuera de abertura - encerrado en una zona anular cónica desde  $\theta_{max}$  hasta  $\theta_c$ , el cual alcanza la superficie lateral de la fibra con un ángulo menor que el crítico  $\theta_c$  y pasa de los núcleos al intercalado y a los núcleos vecinos;  $\Psi_u$ , el flujo que incide en las caras de entrada de las capas de revestimiento (Fig. II-12).

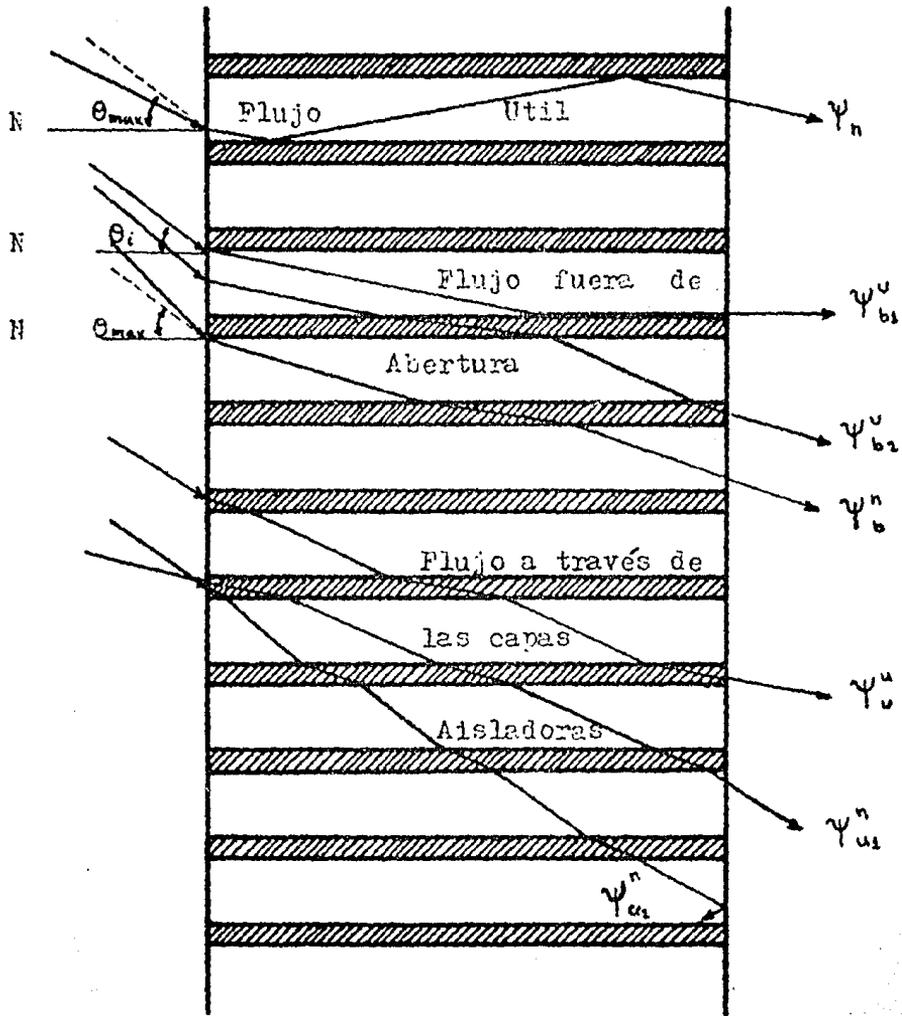


Fig. II-12. Tipos de flujo óptico en un sistema fibroso.

Por lo tanto el flujo total queda como:

$$\Psi = \Psi_n + \Psi_b + \Psi_u$$

Los flujos  $\Psi_b$  y  $\Psi_u$  salen por la cara de salida, tanto por los núcleos como por el revestimiento, así cada uno de ellos se divide en dos partes; la que sale a través de las caras de los núcleos  $\Psi_b^n$  y  $\Psi_u^n$  y la que sale a través de las caras del revestimiento o intercalado  $\Psi_b^u$  y  $\Psi_u^u$ . Así a la salida el flujo está dividido en cinco componentes:

$$\Psi = \Psi_n + \Psi_b^n + \Psi_b^u + \Psi_u^n + \Psi_u^u$$

pero sólo  $\Psi_n$  es el portador de la información útil y los otros crean un fondo parásito que disminuye el contraste de la imagen transmitida.

Con respecto a la inclinación de salida de los flujos, el flujo  $\Psi_b^u$  sale con menor pendiente que a la entrada, los flujos  $\Psi_n$ ,  $\Psi_b^n$ ,  $\Psi_u^u$  tienen a la salida un ángulo de inclinación igual que a la entrada y el flujo  $\Psi_u^n$  sale con mayor pendiente.

El ángulo de salida mínimo de los rayos de  $\Psi_u^n$  es igual a  $\theta_{max}$  cuando hay incidencia normal de los rayos a la entrada. Al aumentar  $\theta_i$  el ángulo de salida  $\theta_s$  crece, cuando  $\theta_i = 90^\circ - \theta_{max}$  alcanza  $90^\circ$ , es decir, se desliza o desliza por la cara de salida. Si el ángulo de entrada de un haz dirigido  $\theta_i$  es mayor que  $\theta_i^k$  el componente  $\Psi_u^n$  experimenta una reflexión total interna en la cara de salida y regresa a través de la fibra.

Si, en cambio es un haz cónico el que incide con un ángulo de abertura  $\theta_i > \theta_i^k$ , la parte  $\Psi_{u_1}^n$  del componente  $\Psi_u^n$  confinada en el cono con abertura de  $0^\circ$  hasta  $\theta_i^k$  sale de la pieza, mientras que la otra parte  $\Psi_{u_2}^n$  que tiene una abertura desde  $\theta_i^k$  hasta  $\theta_i$  experimenta una reflexión total interna en la cara de salida.

Por tanto para un haz cónico de rayos con abertura  $\theta_i$ , donde  $\theta_i > \theta_i^k = 90^\circ - \theta_{max}$ , el flujo de entrada se divide a la salida en seis componentes

$$\Psi = \Psi_n + \Psi_b^n + \Psi_b^u + \Psi_{u_1}^n + \Psi_{u_2}^n + \Psi_u^u$$

de las cuales  $\Psi_{u_2}^n$  no sale a través de la cara de salida de la pieza.

Existe otro fenómeno, llamado del rayo límite, cuando  $\theta_i = \theta_{max}$ , las caras de los núcleos y de los revestimientos tienen prácticamente igual iluminación, mientras que las fronteras que las separan aparecen como un borde brillante. Producto del caso límite en el que el ángulo de refracción alcanza  $90^\circ$ . Cuando el espesor del intercalado es mayor que el doble de la profundidad de penetración del rayo límite, las fibras están separadas no solamente por los bordes brillantes, sino también por el vidrio opaco del revestimiento.

El rayo límite se propaga a lo largo de la frontera núcleo revestimiento de tal manera que el plano del rayo forma cier-

to ángulo diferente de cero con respecto al eje de la fibra - y se propaga siguiendo una línea helicoidal de rotación a izquierda y a derecha con un determinado paso, el rayo límite - es el caso extremo para el flujo  $\Psi_n$ , el rayo límite no se observa en forma de un punto luminoso sino de una cenefa brillante, esto es a consecuencia de la trayectoria helicoidal.

Los rayos del flujo  $\Psi_n$  y los rayos límite se diferencian - no sólo por el carácter de la trayectoria de propagación, sino también por el hecho de que salen del haz de fibras con diferentes ángulos, los rayos del flujo útil salen de dicha pieza con una pendiente igual al ángulo de inclinación en la entrada, mientras que el rayo límite sale bajo un ángulo menor.

De esta forma la componente  $\Psi_b^u$  de la radiación que se propaga por un haz de fibras está compuesta de dos flujos:

$\Psi_b^u = \Psi_{b_1}^u + \Psi_{b_2}^u$ , donde  $\Psi_{b_1}^u$  es el flujo que sale de la cara de salida de la envoltura de aquel núcleo en cuya cara de entrada incidió dicho flujo y  $\Psi_{b_2}^u$  es el flujo que sale de las caras de salida de los revestimientos de los demás núcleos, - es decir, el flujo que llega hasta las caras de salida de los revestimientos gracias a múltiples refracciones y a reflexiones de Fresnel en las fronteras núcleo-revestimiento y revestimiento-núcleo. Ambos flujos que forman la componente  $\Psi_b^u$  salen bajo un mismo ángulo de inclinación respecto al eje de la

pieza fibrosa, pero uno de ellos, el compuesto por los rayos límite es el portador de la información útil para la imagen - y el otro que sale de los revestimientos de los núcleos vecinos, tan sólo disminuye el contraste. Por lo tanto la fórmula del flujo de salida adquiere la forma:

$$\Psi = \Psi_n + \Psi_b^n + \Psi_{b_1}^u + \Psi_{b_2}^u + \Psi_{a_1}^n + \Psi_{a_2}^n + \Psi_a^u$$

El flujo  $\Psi$  que incide en la cara de entrada del haz de fibras se divide en siete componentes;

$\Psi_n$  - Flujo de información que sale a través de la cara del núcleo, en cuya cara de entrada incidió dicho flujo.

$\Psi_a^u$  - Flujo a través del revestimiento, que incide sobre las caras de entrada de las envolturas aisladoras de luz y sale a través de las caras de salida de éstas.

$\Psi_{a_1}^n$  - Flujo a través del revestimiento, incide en las caras de entrada de los revestimientos y sale a través de las caras de salida de los núcleos.

$\Psi_{a_2}^n$  - Flujo a través del revestimiento, incide en las caras de entrada de los revestimientos y llega hasta las caras de salida de los núcleos (no sale de la pieza pues experimenta una reflexión interna total en las caras de salida de los núcleos).

$\Psi_{b_1}^u$  - Flujo fuera de abertura, incide en la cara de entrada del núcleo y sale a través de la cara de salida del revesti-

miento del mismo.

$\Psi_{b_2}^u$  - Flujo fuera de abertura, incide en la cara de entrada del núcleo y emerge a través de las caras de salida de los revestimientos de los demás núcleos.

$\Psi_b^n$  - Flujo fuera de abertura, incide en las caras de entrada de los núcleos y emerge a través de las caras de salida de otros núcleos.

#### EFECTO DE LOS TRES ANILLOS.

Si  $\theta_i > \theta_{max}$  en el plano perpendicular al eje de la pieza, se observan tres anillos luminosos y a ello se ha convenido en denominar "el efecto de los tres anillos".

Para cualquier pieza constituida por fibras ópticas, los casos más característicos de incidencia de un haz de rayos dirigido sobre la cara de entrada y que finalmente determina los parámetros ópticos de la pieza son los siguientes:

- 1) El ángulo de incidencia del haz de rayos dirigido sobre la cara de entrada de la pieza es de  $\theta_i = 0^\circ$ ;
- 2)  $0^\circ < \theta_i < \theta_{max}$ ;
- 3)  $\theta_i = \theta_{max}$ ;
- 4)  $\theta_{max} < \theta_i < \theta_i^k = 90^\circ - \theta_{max}$ ;
- 5)  $\theta_i \geq \theta_i^k$ .

La distribución luminosa sobre la salida de la pieza fibrosa descubre la variación del efecto de los tres anillos para los cinco casos característicos.

Aplicando luz monocromática (con una longitud de onda de -

0.550  $\mu\text{m}$ ), a un haz de fibras ópticas, se obtuvieron los siguientes resultados (los índices de refracción de los medios a la entrada y salida del manajo eran iguales a 1).

En la Fig. II-13 se muestra la distribución luminosa de la radiación que sale de una pieza para una incidencia normal ( $\theta_i = 0^\circ$ ) del haz de rayos dirigidos a la cara de entrada de la pieza. La mancha luminosa corresponde a las componentes  $\Psi_n + \Psi_u^u$  del flujo y el anillo luminoso a la componente  $\Psi_u^n$ ; como se ve, para las componentes  $\Psi_n$  y  $\Psi_u^u$ , el ángulo de salida de la pieza es  $\theta_s = \theta_i = 0^\circ$ , mientras que para  $\Psi_u^n$  se tiene  $\theta_s > \theta_i = 0^\circ$ .

La Fig. II-13 (b), muestra la distribución luminosa en la salida de una pieza para un ángulo de incidencia ( $\theta_i < \theta_{\text{max}}$ ) las componentes del flujo saliente permanecen igual a las del caso anterior, pero la mancha central  $\Psi_n + \Psi_u^u$  se transforma en un anillo luminoso, mientras que el anillo exterior  $\Psi_u^n$  aumenta su diámetro, para las componentes  $\Psi_n$  y  $\Psi_u^u$  tenemos  $\theta_s = \theta_i$  y para  $\Psi_u^n$ ,  $\theta_s > \theta_i$ .

En la Fig. II-13 (c), se muestra la distribución luminosa a la salida de la pieza para  $\theta_i = \theta_{\text{max}}$ ; la mancha luminosa interior es la componente  $\Psi_u^u$ , para esta componente  $\theta_s = 0^\circ$ , aunque  $\theta_i \neq 0^\circ$ . La aparición de la componente  $\Psi_u^n$  corresponde al caso en el que se observa el rayo límite de la reflexión to--

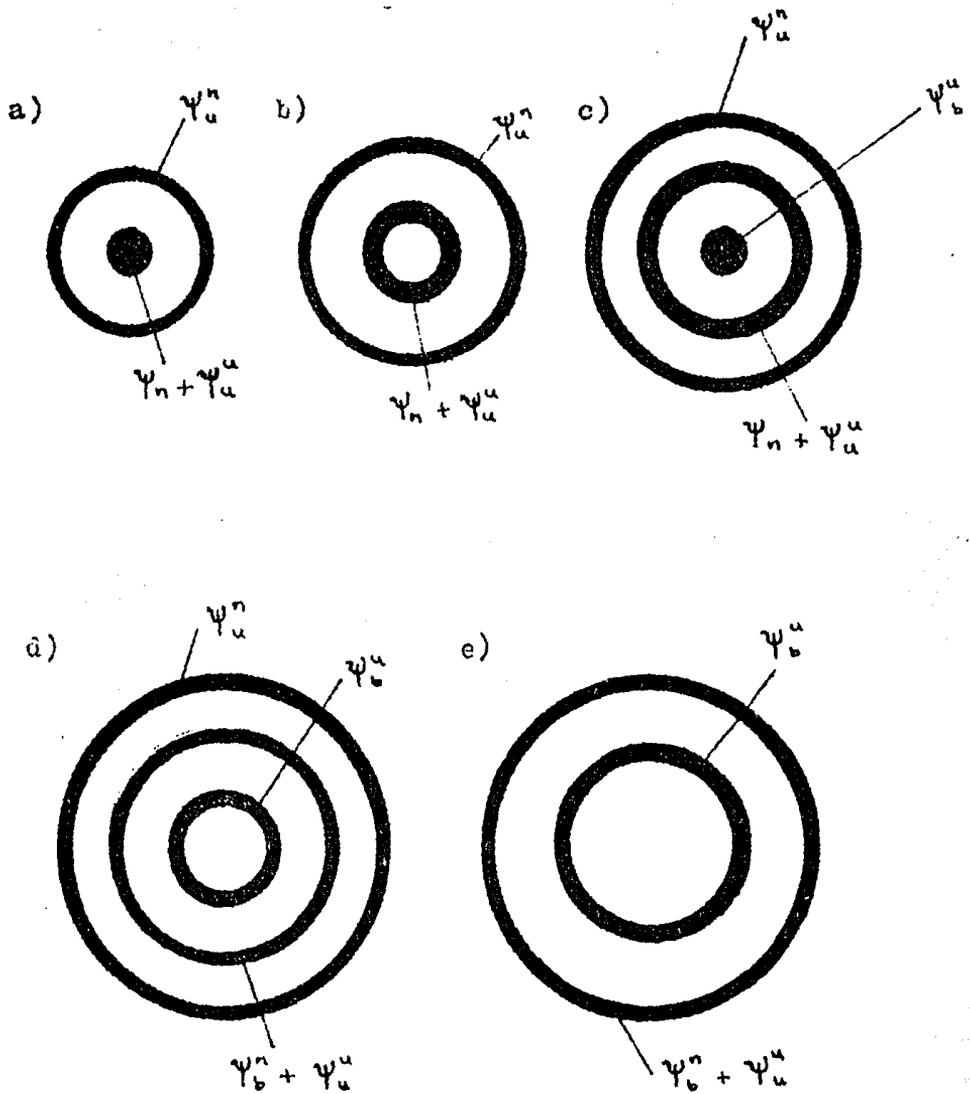


Fig. II-13. Variación del efecto de los tres anillos con luz monocromática.

tal interna que se propaga a lo largo de la frontera de separación núcleo-revestimiento. Para  $\theta_i = \theta_{max}$ , los anillos luminosos exteriores que corresponden a las componentes  $\Psi_n + \Psi_a^u$  y  $\Psi_a^n$  aumentaron de diámetro debido al aumento del ángulo de salida  $\theta_s$ .

En la Fig. II-13 (d), para  $\theta_{max} < \theta_i < \theta_i^k$ , la mancha luminosa interior  $\Psi_b^u$  se transforma en un anillo, mientras que los anillos exteriores aumentan su diámetro, además los anillos exterior e interior, como antes, corresponden a las componentes  $\Psi_a^n$  y  $\Psi_b^u$ , entonces el anillo central corresponde a  $\Psi_a^u$  y  $\Psi_b^n$  ya que para un ángulo  $\theta_i$  de incidencia de los rayos en la cara de entrada de la pieza, mayor que la abertura nominal  $\theta_{max}$  de las fibras, no puede existir flujo útil. En lugar de la componente  $\Psi_n$  aparece el flujo  $\Psi_b^n$ ; los rayos que han incidido en las caras de entrada de los núcleos han salido a través de la cara de salida de los demás núcleos.

En la Fig. II-13 (e), para  $\theta_i \geq \theta_i^k$ , el anillo exterior  $\Psi_a^n$  debe desaparecer, puesto que la componente  $\Psi_a^n$  para  $\theta_i > \theta_i^k$  debe experimentar una reflexión total interna en las caras de salida de los núcleos, por lo tanto quedan tan sólo dos anillos, correspondientes a las componentes  $\Psi_b^u$  y  $\Psi_a^u + \Psi_b^n$ , que comparadas con el caso anterior han aumentado su diámetro.

El ángulo de salida de los rayos de la pieza para las com-

ponentes  $\Psi_a^n$  y  $\Psi_b^u$  depende de la abertura numérica nominal AN - de las fibras ópticas y ésta es función de la longitud de onda de la radiación transmitida y ello conduce a que, para un ángulo dado de incidencia  $\theta_i$  de los rayos sobre la cara de entrada de la pieza, los ángulos de salida  $\theta_s$  para rayos con distintas longitudes de onda no son iguales. Al aumentar la longitud de onda de la radiación, la abertura nominal de las fibras ópticas disminuye, la radiación de onda larga para  $\Psi_a^n$  sale de la pieza bajo un ángulo menor, mientras que para  $\Psi_b^u$ , bajo un ángulo  $\theta_s$  mayor. Esto debe originar la descomposición de la luz blanca a la salida de la pieza en los anillos interior y exterior, y además, con una distribución contraria de los colores en ellos.

Cuando  $\theta_i = 0^\circ$ , en la Fig. II-14 (a) se observa la distribución luminosa sobre la salida de la pieza, en el centro se obtiene una mancha luminosa blanca (las componentes  $\Psi_n$  y  $\Psi_a^u$ ) y un anillo coloreado exterior  $\Psi_a^n$ , con una variación continua de colores, desde el rojo (en la parte interna del anillo), hasta el violeta (en la periferia).

Cuando  $0^\circ < \theta_i < \theta_{max}$ , la mancha central se transforma en anillo, que como antes se mantiene blanco, mientras que el anillo exterior aumenta de diámetro, conservando la misma distribución de colores (Fig. II-14 b).

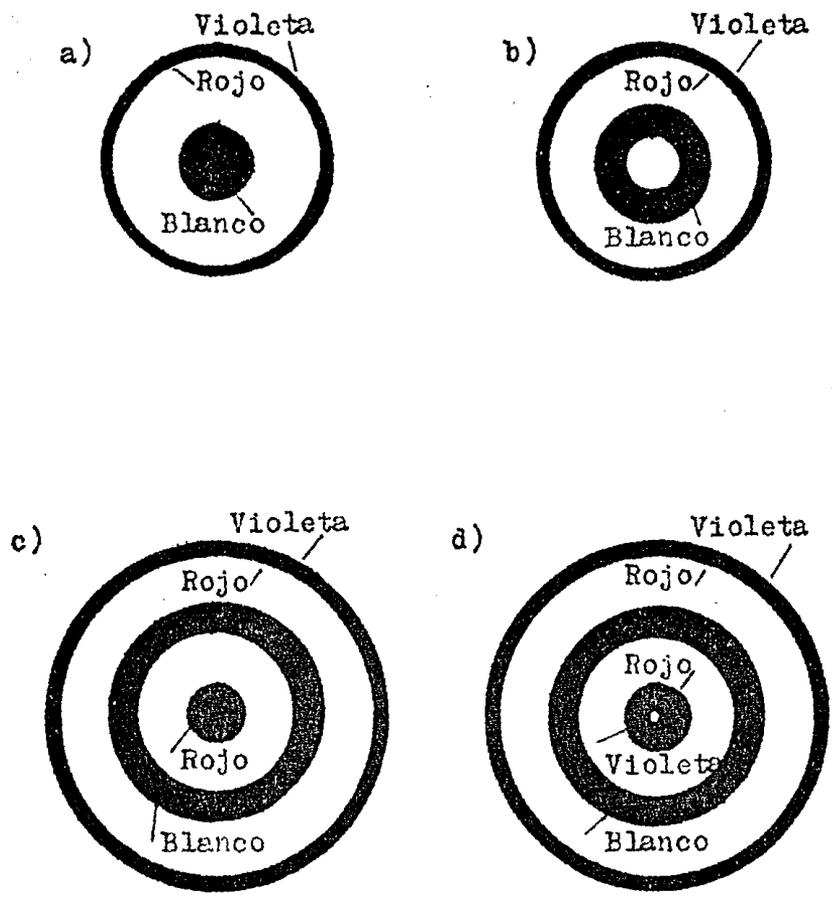


Figura II-14. Variación del efecto de los tres anillos con luz blanca.

Con  $\theta_i > \theta_{max}$  ( $\theta_i = 31.8^\circ$ , para una longitud de onda de  $0.700 \mu m$ ), tanto el anillo blanco como el anillo externo de colores aumentan de diámetro, mientras que en el centro aparece una mancha roja  $\Psi_0^u$  (Fig. II-14 c), la cual al aumentar el ángulo  $\theta_i$ , se convierte en anillo, y en el centro aparecen los siguientes colores de longitud de onda más corta.

El aumento ulterior del ángulo  $\theta_i$  conduce a un crecimiento del diámetro de los anillos; la distribución de los colores en los anillos interno y externo se conservan, mientras que el anillo central permanece blanco.

Como se ve en la Fig. II-14 d, la distribución de los colores en los anillos exterior e interior es contraria.

De lo expuesto anteriormente, se aprecia que el efecto de los tres anillos, describe las leyes que rigen la propagación de una radiación a través de un haz de fibras ópticas, es decir, determina las características ópticas de una pieza fibrosa. Por esta razón el efecto de los tres anillos indica los principios de la aplicación de los elementos fibrosos en la construcción de aparatos y debe siempre tenerse en cuenta al utilizar piezas fibrosas en sistemas ópticos concretos.

#### TRANSFERENCIA DE IMAGENES POR MEDIO DE FIBRAS OPTICAS.

La transferencia de una imagen óptica por un haz de fibras

ópticas, está determinada por factores como son: el carácter mosaico de la estructura de la pieza fibrosa, las pérdidas de la información transmitida, las limitaciones del poder resolutivo del haz de fibras, etc.

La pieza fibrosa transfiere la imagen que ha sido formada por métodos de contacto o de proyección sobre su cara de entrada a la superficie de salida.

Si se aleja el objeto a unas cuantas decenas de micras de la cara de entrada, la transmisión de la imagen es posible pero con pérdida de resolución y contraste de la misma. Análogamente la formación de una imagen sobre un plano no coincidente con su cara de salida, es posible siempre y cuando la distancia hasta el plano no pase de unas cuantas micras. Generalmente a partir de unas dos o tres micras, el poder resolutivo y el contraste de la imagen comienzan a disminuir bruscamente a medida que se aumenta la distancia.

El concepto de formación de imagen en sí, no es aplicable a un haz de fibras ópticas, pues por ejemplo en la Fig. II-15 se muestra que en el filamento o núcleo (1), caen rayos de todos los elementos del objeto, mientras que, por otra parte - desde el elemento A del objeto parten rayos, que alcanzan todos los núcleos de la cara de entrada de la pieza fibrosa, es decir, la información es transmitida y la cara de salida se -

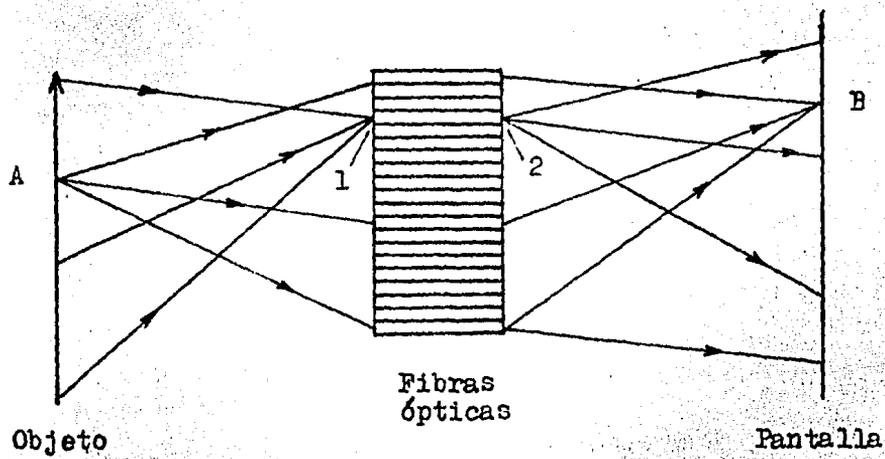
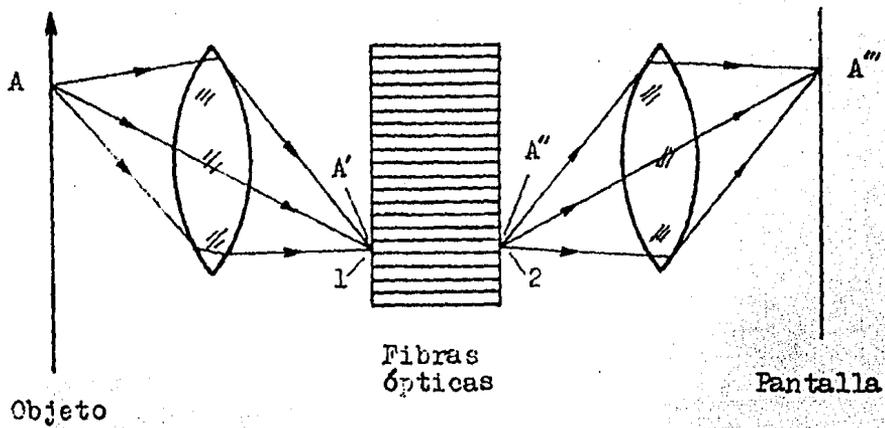


Fig. II-15. Transferencia de imágenes por medio de un manojó de fibras ópticas.

encuentra más o menos uniformemente iluminada, pero no se puede hablar de ninguna semejanza de la imagen con el objeto, el flujo sale cubriendo todas las direcciones en un cono determinado y la imagen transferida tiene una estructura geométrica compleja. En suma, al punto B de la pantalla llegan rayos de todos los núcleos, mientras que de un núcleo determinado, salen rayos hacia todos los puntos de la pantalla, o sea que a la pantalla llega información pero con pérdida completa de la estructura original.

Al transmitir una imagen con ayuda de la óptica clásica, - por ejemplo por medio de un objetivo, el amplio haz de rayos que parten del elemento A del objeto es recogido por el objetivo en una mancha  $A'$ , que es la imagen del elemento A y cubre uno o varios núcleos, la imagen  $A''$  transmitida al extremo de salida del haz de fibras es la del elemento A y satisface en cierto grado la semejanza de la imagen al objeto, la imagen - que se transmite se puede observar con el ojo (que es un sistema óptico, compuesto de un objetivo - cristalino y una pantalla - retina), se puede registrar (con una placa fotográfica) o proyectar en una pantalla, con ayuda de un segundo objetivo. En este caso, todos los rayos que salen de un núcleo, por ejemplo del 2, se reúnen en una mancha  $A'''$ , que es la imagen - del elemento A.

Toda pieza fibrosa se elabora a partir de un manojo de núcleos separados por envolturas aisladoras de luz, el flujo útil que incide en la cara de entrada de un núcleo se propaga a través del mismo y sale por el extremo opuesto, repartiendo se por la superficie del último, independientemente de la distribución de la luminosidad en la del primero, es decir, cada núcleo individual transfiere solamente la información relativa a uno sólo de los elementos de la imagen que ha sido proyectada sobre su cara de entrada.

Una transferencia tal, desde la cara de entrada hasta la de salida constituye una de las diferencias fundamentales de cualquier pieza fibrosa como haz de fibras individuales. La imagen que se transmite está constituida por un conjunto de elementos de diferente brillantez, que corresponden a las caras de salida de núcleos individuales, es decir, la imagen se recibe en forma de mosaico.

Los elementos fibrosos para la transmisión de imágenes ópticas están constituidos por construcciones multifilares con igual distribución de núcleos elementales, conductores de luz, ambos extremos del haz, son obligatoriamente iguales por su forma y superficie de trabajo, y, como regla general de secciones rectas.

La transmisión de luz de los conductos se determina por la

relación entre el flujo luminoso de entrada y el de salida - por ambos extremos, es decir, equivale al rendimiento energético. En cuanto a la transmisión de luz, se requiere; una gran resolución y que la imagen tenga un determinado contraste, - teniéndose así un alto rendimiento informativo.

En los sistemas ópticos destinados a la transmisión de imágenes, la transmisión de luz y el coeficiente de transmisión de contraste, el poder resolutivo y los ruidos micro y macro-estructurales están tan ligados entre sí, que es imposible la variación arbitraria de uno sin afectar a otro. De aquí que - las características ópticas, tales como, la abertura numérica, la transmisión de luz, el coeficiente de transmisión de contraste, el poder resolutivo y los ruidos estructurales de los sistemas ópticos. Deben considerarse en su interrelación para cada caso concreto de las condiciones de trabajo de las fibras ópticas en los instrumentos.

La transmisión de imágenes ópticas implica la utilización de haces de fibras y éstos además de las cuatro causas básicas de pérdidas en los cables monofilares (transmisibilidad, reflexión de la luz en las caras, atenuación de la luz por el material de que está construida la fibra y pérdidas de luz en las reflexiones internas), acarrea otra causa de pérdida de luz, y ésta es, el área que ocupan sobre la cara de entrada -

las envolturas aisladoras de luz. Si un manojo de fibras recibe sobre su cara un haz luminoso incidente y si éste tiene un ángulo de abertura  $\theta_i \leq \theta_{max}$ , solamente será útil la parte del flujo incidente que cae sobre las caras de entrada de los núcleos. Esta pérdida de luz está en dependencia del diámetro de los núcleos, del carácter de su disposición, del espesor de la envoltura, la superficie de la cara ocupada por las envolturas constituye del 10 al 50% del área de toda la cara del manojo.

La máxima transmisión de luz por un manojo de fibras se obtiene si los núcleos como las envolturas tienen una disposición hexagonal dentro del manojo.

La imagen aceptable de la cara de salida de una pieza fibrosa está restringida, pues el ojo resuelve objetos de un tamaño cercano a  $100 \mu m$ . Si la imagen de la cara de salida se examina por medio de un ocular, con un aumento tal que los elementos de la estructura tengan un tamaño de  $100 \mu m$ , es decir, que se puedan distinguir, el cuadro que se observa va a ser de tipo mosaico, desagradable a la vista y difícilmente analizable. Cualquier defecto del manojo, por ejemplo la presencia de núcleos que no dejen pasar la luz, perturba la observación. Al ampliar la cara de salida se amplían también los núcleos y las envolturas, pero la multiplicidad permisi-

ble de ampliación es restringida por el diámetro de los núcleos. Con un espesor de las envolturas de 0.5 a 1.0  $\mu\text{m}$ , el aumento está limitado a un tamaño de 100  $\mu\text{m}$  y la multiplicidad admisible es respectivamente de 200 a 100. Si en este caso el diámetro de los núcleos está entre 2 y 5  $\mu\text{m}$ , la multiplicidad admisible se encontrará respectivamente entre 50 y 20. Esta característica de la estructura del manojo de fibras y de la imagen transmitida constituye uno de los defectos desagradables de las piezas fibrosas, que disminuyen de hecho todos sus aspectos ópticos, por ello se han buscado diferentes métodos para disminuir la influencia del carácter mosaico de la estructura en los arreglos fibrosos y de su completa eliminación. Entre los más empleados se encuentran:

El desplazamiento transversal de los haces de fibras, la vibración de la imagen con respecto al manojo de fibras, la creación de haces inestructurados de fibras, la colocación de microlentes sobre los toques de los núcleos, el método de eliminación espectral del carácter mosaico de la estructura y la filtración espacial óptica de la estructura.

A pesar de que no se puede hacer una confrontación definitiva entre los sistemas ópticos clásicos y los sistemas fibro ópticos, es obvio que la gran desventaja de los manojos de fibras radica en que la imagen transmitida es mosaica.

## Capítulo III

### MÉTODOS DE FABRICACION Y TIPOS DE CABLES.

En la actualidad se emplean diferentes tecnologías para la fabricación de fibras ópticas. Todos estos métodos persiguen que la fibra presente mínimas pérdidas (para disminuir la atenuación), gran ancho de banda y una determinada abertura numérica.

A continuación se describen algunos métodos.

#### Método CVD (Deposición Química de Vapor).

La fabricación de las primeras fibras, empleando este método fue llevada a cabo por la firma Corning Glass Works de EU.

El material inicial consiste de un tubo de cuarzo de aproximadamente 20 mm de diámetro externo y de 1 m de longitud. En el interior del tubo se deposita vidrio en estado gaseoso. El tubo constituirá el revestimiento de la fibra y el vidrio precipitado el núcleo (Fig. III-1).

La descripción del proceso de fabricación es la siguiente:  
Se hace pasar oxígeno a través de una serie de recipientes

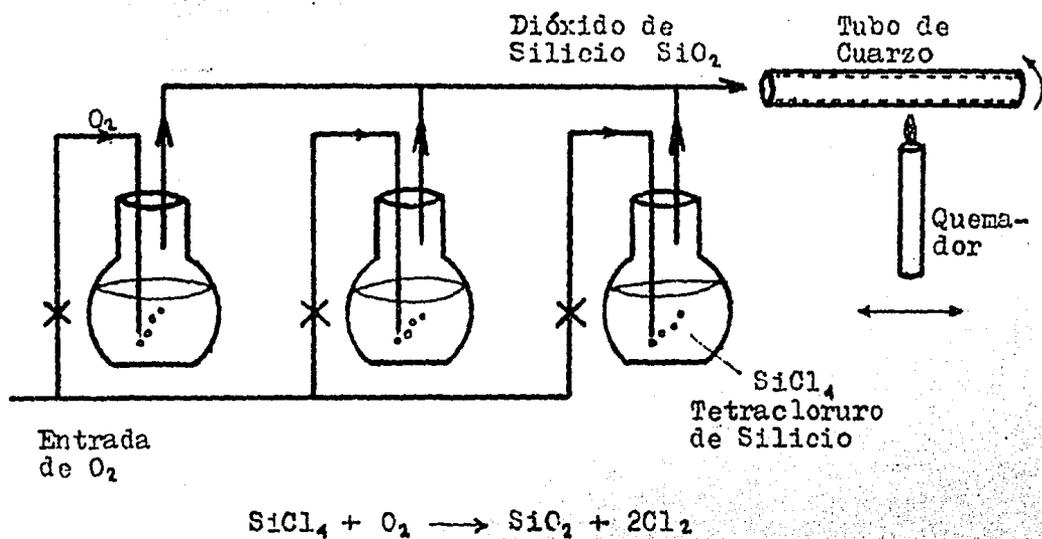


Fig. III-1. Método CVD para la fabricación de fibras ópticas.

que contienen compuestos de silicio, como es el tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ), los cuales al reaccionar con el oxígeno - producen dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), componente fundamental de las fibras ópticas.

Simultáneamente el tubo de cuarzo es colocado en un torno, el cual lo hace girar a una velocidad determinada, mientras - tanto es calentado por un quemador que se desplaza en vaivén a lo largo del mismo.

La mezcla de sustancias químicas y oxígeno reaccionan en - la zona calentada del interior del tubo, formando una delgada película de dióxido de silicio (vidrio).

Para conseguir fibras de índice de refracción gradual, se requiere que durante el proceso de fabricación se cambie la - composición del vidrio que se deposita, lo cual se consigue - variando el grado de envenenamiento del silicio, con elemen- - tos como el germanio.

Terminada la fase de deposición, se aumenta la temperatura del quemador y se disminuye su velocidad de vaivén, el tubo - se contrae a causa de la tensión superficial, formándose así, una barra maciza con el vidrio depositado, en el centro, obteniéndose una barra con un diámetro de 8 a 12 mm.

La barra así obtenida, se fija por encima de un horno de - alta temperatura ( $2400^\circ\text{C}$ ), el horno es calentado por una re-

sistencia que posee un elemento de grafito.

La barra se sumerge en el horno con velocidad constante, - la parte de la barra de vidrio que se encuentra en la zona ca-  
liente del horno se reblandece y se estira hasta formar una -  
fibra con un diámetro externo de  $125 \pm 1 \mu\text{m}$ , con ayuda de un  
láser se mide continuamente el diámetro de la fibra, mientras  
dura el proceso de estirado.

Posteriormente se aplica a la fibra una primera protección  
de plástico, haciéndola pasar por un depósito de goma silicó-  
nica, la cual se endurece al calentarla por medio de un horno  
y por último la fibra es enrollada en un tambor con un diáme-  
tro de aproximadamente 1 m.

De una barra de vidrio se obtiene por lo general de 3 a 4  
Km de fibra.

#### Método DC (Doble Crisol).

Las sustancias fundamentales en la composición del vidrio  
para las fibras elaboradas con este método son: óxido de so-  
dio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) y dióxido de silicio ( $\text{Si}$   
 $\text{O}_2$ ).

La proporción de estas sustancias en la composición del vi-  
drio determina el índice de refracción del mismo. De este mo-  
do se consigue la diferencia óptima entre los índices de re-

fracción de los vidrios que conforman el núcleo y el revestimiento de la fibra, para así obtener la A. N. deseada.

También se busca que los coeficientes de dilatación térmica de ambos tipos de vidrio sean casi iguales para disminuir las tensiones internas.

Los componentes se mezclan y funden en un crisol de cuarzo a una temperatura de 1100 a 1300°C.

Los tipos de vidrio correspondientes al núcleo y al revestimiento se colocan en dos crisoles metálicos concéntricos - (Fig. III-2).

El vidrio que ha de conformar el núcleo de la fibra se coloca en el crisol interno, mientras que en el crisol externo se colocan los componentes del revestimiento. Cuando el vidrio se ha fundido en los crisoles, empieza a fluir hacia el exterior a través de las boquillas de los crisoles. El vidrio del núcleo se mezcla con el del revestimiento en la boquilla del crisol externo.

La velocidad con que fluyen los vidrios está determinada por la viscosidad de los mismos. Esto se lleva a cabo con una temperatura aproximada de 1000°C.

A la salida del crisol el vidrio se estira para formar la fibra, a una temperatura de 850 a 950°C, posteriormente se le aplica una protección de plástico al pasar la fibra por un de

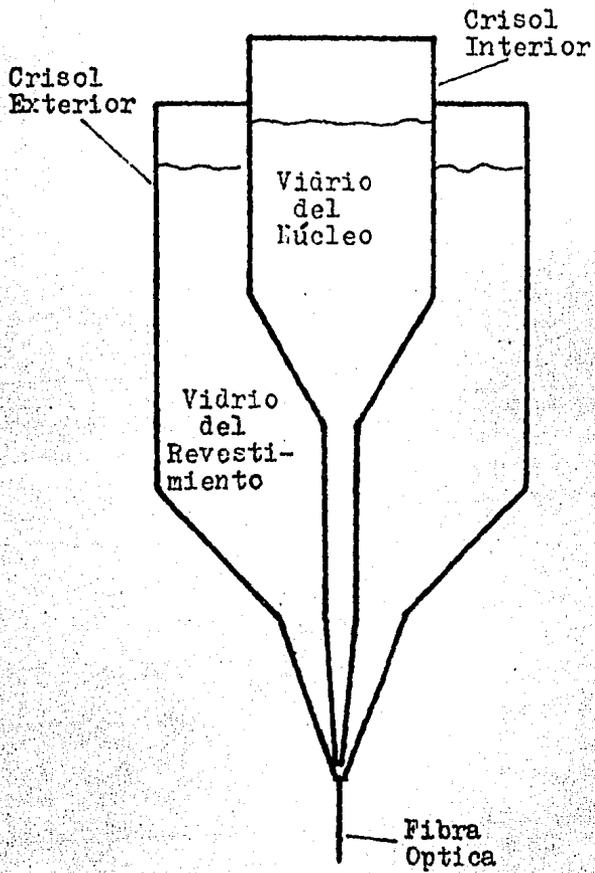


Fig. III-2. Estructura del Crisol Doble (DC).

posito de goma silicónica, quedando lista para ser bobinada - en tambores con diámetros aproximados de 1 m.

Con este método se fabrican fibras de índice escalonado, - el vidrio que compone el núcleo presenta un índice de refracción constante.

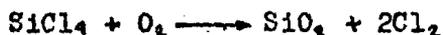
Método ALPD (Deposición Axial y Lateral por medio de Plasma).

Las fibras de índice escalonado fabricadas con este método presentan pocas pérdidas. El procedimiento de fabricación es el siguiente:

El núcleo de la fibra se elabora depositando axialmente el silicio fundido, mediante un aspersor por plasma (Fig. III-3).

En un aspersor, un gas inerte (por lo general nitrógeno) - es transformado en plasma (16000°C) al pasar por un arco eléctrico y por la tobera del aspersor, el material de revestimiento se introduce en el plasma que lo proyecta al exterior.

Se envía tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ), a través del aspersor por plasma, al combinarse con oxígeno, reacciona formando dióxido de silicio, de acuerdo a la siguiente fórmula



El vidrio puede o no ser depositado sobre una barra de silicio que actúa como semilla. Mediante la aplicación de suce-

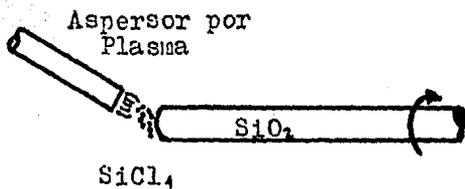


Fig. III-3. Producción del vidrio para el núcleo, por deposición axial.

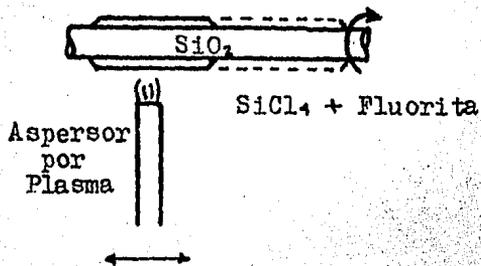


Fig. III-4. Fabricación del revestimiento por deposición lateral.

sivas capas se va formando una barra de 8 cm de diámetro y de 3 a 3.5 m de longitud. El proceso permite controlar el contenido de iones  $\text{OH}^-$  en el vidrio.

El siguiente paso consiste en depositar lateralmente sobre la barra de vidrio, una serie de capas de silicio conteniendo fluorita (fluoruro de calcio). La fluorita se emplea para disminuir el índice de refracción (Fig. III-4).

La deposición de esta capa es lateral y se lleva a cabo empleando un aspersor por plasma. La capa así constituida forma el revestimiento de la fibra.

El último paso es la deposición lateral de una capa de cuarzo mediante el aspersor por plasma. Ver Fig. III-5.

Esta capa de cuarzo es el equivalente al tubo de cuarzo en las fibras construidas con el método CVD, contribuye a que exista una relación concéntrica óptima entre el núcleo, el revestimiento y la cubierta.

Debido al empleo del aspersor por plasma, se obtiene un vidrio casi seco, lo cual permite disminuir al mínimo los iones  $\text{OH}^-$  del agua que contiene el vidrio. Esto evita considerables pérdidas por absorción de la luz.

Las barras de vidrio así producidas son estiradas dentro de un horno.

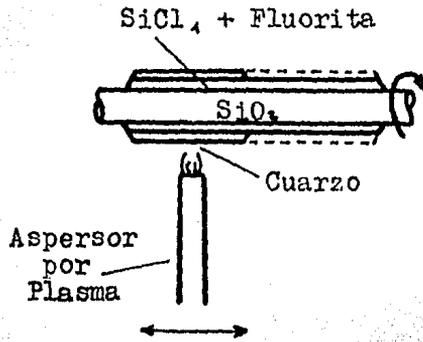


Fig. III-5. Deposición lateral de cuarzo.

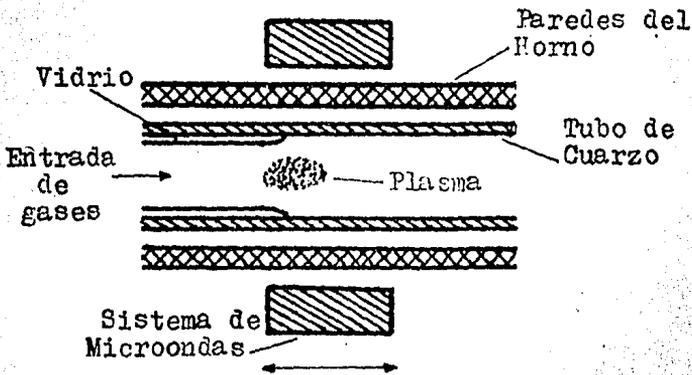


Fig. III-6. Descripción del proceso CVD inducido por Plasma.

### Método PCVD (Deposición Química de Vapor por Plasma).

Empleando este proceso se pueden depositar varios miles de capas (Fig. III-6). El tubo de cuarzo es precalentado en un horno estacionario (a 1000°C).

Mediante plasma se depositan los gases en las paredes del tubo de cuarzo, produciéndose una capa sólida de vidrio, el plasma recorre el tubo muy rápido, depositando cada vez más capas.

### TIPOS DE CABLES DE FIBRAS OPTICAS.

En el diseño de un cable de fibras ópticas, deben tomarse en cuenta el tipo de fibras y el número de éstas que ha de emplearse (lo cual depende de la finalidad a la que está destinado el cable).

Deben considerarse las características mecánicas del tendido, sea éste aéreo o subterráneo (los esfuerzos laterales y axiales, y los momentos flexionantes, producen en las fibras ópticas alteraciones físicas ocasionando con esto pérdidas en las señales transmitidas). Lo mismo las condiciones ambientales del terreno donde se efectúa la instalación, en un ambiente húmedo y bajo condiciones de tensión, las fibras ópticas sufren un proceso de envejecimiento que provoca la ruptura de

las fibras.

Por lo anterior el diseño del cable debe procurar aislar a las fibras ópticas de esfuerzos mecánicos excesivos, y también brindarles protección contra la humedad.

Otros factores que disminuyen la potencia óptica transmitida a través de las fibras ópticas son: el radio de curvatura, y las microcurvaturas que se producen en éstas. Para disminuir los efectos de las microcurvaturas, se requiere de un cable que reduzca las fuerzas de tensión excesivas en las fibras. Para evitar la humedad se emplea una capa compuesta de aluminio y polietileno de alta densidad.

Según la protección de las fibras ópticas, los cables se pueden clasificar en:

Cables con protección estrecha para las fibras ópticas. Aquí las fibras se encuentran en contacto estrecho con las capas protectoras de diversos materiales.

Cables con protección holgada para las fibras ópticas. Las estructuras donde van montadas las fibras (como son tubos o cilindros ranurados), permiten a éstas un mayor margen de elongación, disminuyendo los problemas ocasionados por microcurvaturas.

Cables con protección estrecha para las fibras ópticas.

### Cable monofibra con protección estrecha.

La fibra óptica tiene una protección secundaria fija de poliéster (Hytrel), que le da dimensiones pequeñas (Fig. III-7). Esta capa protege a la fibra contra microcurvaturas y amortigua las vibraciones que pueden afectar a la fibra.

Los hilos de Kevlar (fibra textil), colocados en espiral - alrededor de la fibra, protegen a ésta en contra de tensiones axiales, también disminuye los efectos que sobre la fibra producen las fuerzas laterales y los golpes.

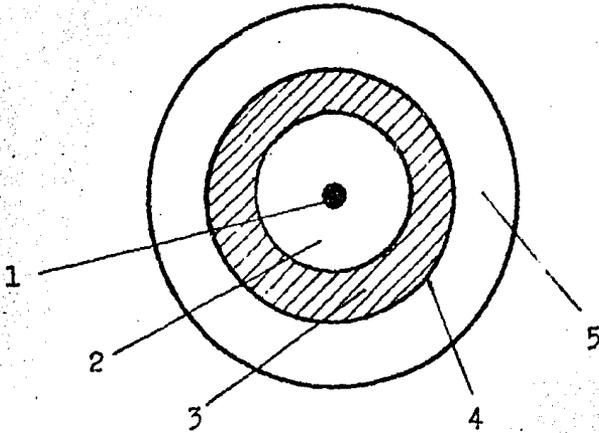
La envoltura exterior es de poliuretano blando y no inflamable. El cable resulta ser dúctil y compacto, la fibra óptica actúa como armadura contra la contracción a bajas temperaturas.

### Cable Compuesto.

Está formado por varias fibras del tipo antes mencionado - (fibras con protección estrecha), ver la Fig. III-8.

El cable consta de un elemento de refuerzo en el centro, - el cual puede ser de material dieléctrico o metálico, según - los requerimientos de la instalación.

En los cables que han de instalarse en forma aérea o subterránea en regiones expuestas a descargas eléctricas o en aqué



1) Fibra óptica con protección primaria de plástico (goma silicónica).

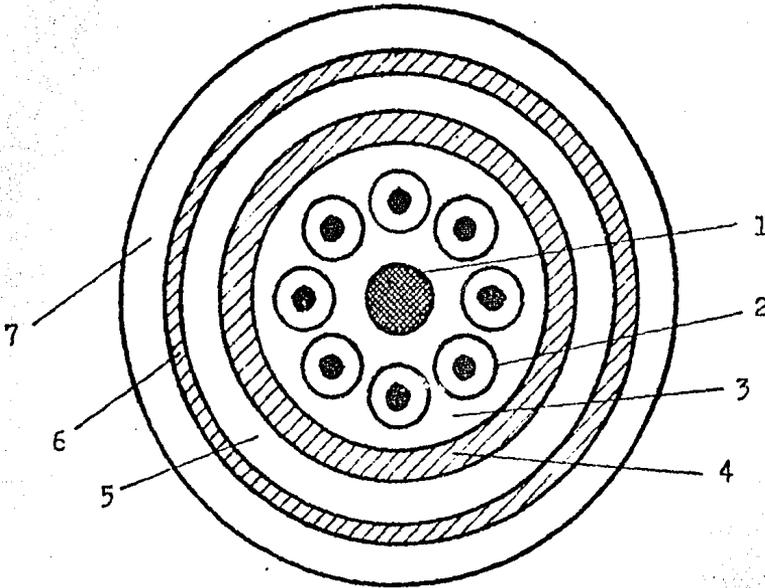
2) Material protector de poliéster (Hytrel).

3) Hilos de Kevlar (armadura antitorsional).

4) Capa de poliéster.

5) Recubrimiento termoplástico (poliuretano no inflamable).

Fig. III-7. Cable de una sola fibra con protección estrecha.



- 1) Miembro de refuerzo (dieléctrico).
- 2) Fibra con protección estrecha.
- 3) Relleno gelatinoso (material de baja viscosidad para evitar la humedad).
- 4) Material de refuerzo (cinturón).
- 5) Envoltura interior.
- 6) Doble capa de hilos de Kevlar (fibra textil).
- 7) Capa protectora de aluminio y envoltura exterior.

Fig. III-8. Cable Compuesto. Conformado por fibras con protección estrecha.

llos que se instalan junto a líneas de alta tensión, se recomienda no tengan partes metálicas. Por lo anterior se emplea un cable con alma de fibra de vidrio, para contrarrestar la fuerza de tracción en el centro.

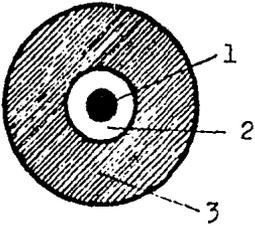
El espacio que queda entre las fibras se llena con un material protector de baja viscosidad. Material gelatinoso (derivado del petróleo), que tiene también la función de proteger a las fibras de la humedad.

#### Cable de fibras ópticas con refuerzo de plástico (FRP).

En la Fig. III-9 se observa la fibra óptica (FRP), la cual está constituida de la siguiente manera:

El núcleo y el revestimiento de la fibra son de vidrio, mientras que la protección primaria es de goma silicónica. La siguiente cubierta protectora es la capa de FRP, la cual está compuesta por fibras de vidrio (más del 60%) y por resina de poliéster (como protección térmica), esta protección permite que la fibra pueda ser usada como cable, proporcionándole suficiente resistencia contra las fuerzas de tensión, durante el período de instalación. La capa protectora es a prueba de agua y presenta gran resistencia a la presión, es flexible y permite el empalme de las fibras.

Con el uso de este tipo de protección en las fibras, pue--

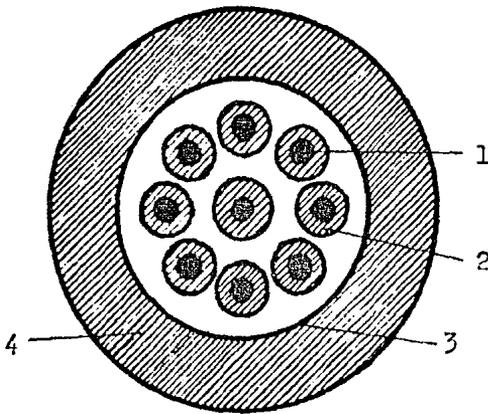


1) Fibra óptica de índice -  
graduado.

2) Protección primaria plás-  
tica (goma silicónica).

3) FRP - Fibra de vidrio -  
(80% aprox.) y resina de po-  
liester.

Fig. III-9. Fibra óptica con protección FRP.



1) Fibra óptica.

2) Cubierta FRP.

3) Cinta de polies-  
ter.

4) Envoltura de po-  
lietileno.

Fig. III-10. Cable con varias fibras ópticas FRP.

den construirse cables ligeros y compactos, sin partes metálicas, de forma que las variaciones de atenuación continúen -- siendo pequeñas, incluso con grandes variaciones de temperatura (Fig. III-10).

Cable con gran número de fibras (protección estrecha).

Las fibras están contenidas en cintas (cada cinta contiene 12 fibras), y el cable lleva 12 cintas (por ende 144 fibras).

Las cintas están colocadas en forma de espiral, con el fin de que las fibras ópticas soporten mejor los radios de curvatura a que es sometido el cable.

Las cintas están rodeadas por capas de diferentes materiales que sirven para la protección de las fibras (Fig. III-11).

Cables con protección holgada para las fibras ópticas.

En estos cables las fibras pueden estar contenidas en tubos, en cintas y en estructuras cilíndricas ranuradas.

Cables de fibras ópticas en tubos.

El cable está formado concéntricamente alrededor de un -- miembro de refuerzo de hilos de acero, recubierto con polietileno. Los hilos de acero sirven, además de soportar las fuer-

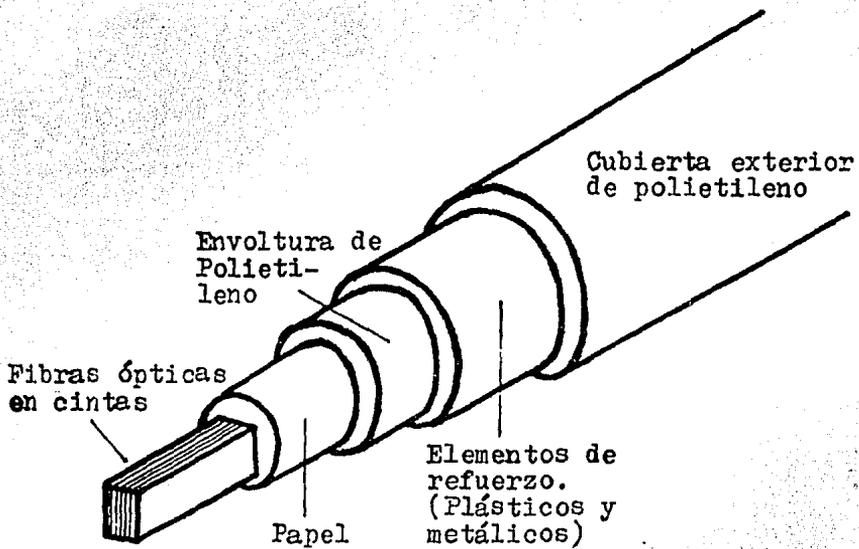


Fig. III-11. Cable con gran número de fibras (protección estrecha, 144 fibras ópticas).

zas de tracción, para contrarrestar las variaciones de longitud dependientes de la temperatura de las partes de plástico.

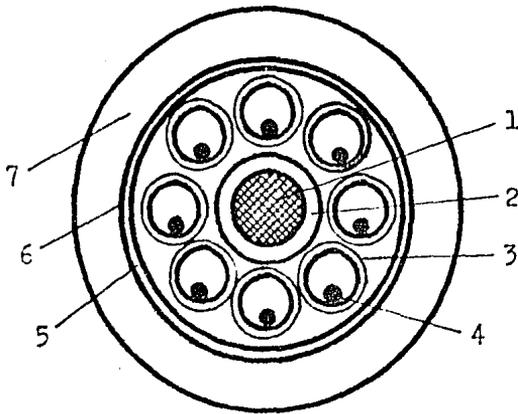
Cada fibra con su protección primaria propia, está protegida además por una capa secundaria, consistente en un tubo de plástico holgado (Fig. III-12). El espacio del tubo es llenado con aire, material gelatinoso o hilos.

Las fibras con sus protecciones secundarias se extienden en espiral alrededor del alma de acero. La relación entre los diámetros externos del alma y de las protecciones secundarias determina el número posible de fibras de una capa.

Alrededor de la capa de fibras se arrollan cintas de poliéster y el cable se encierra por fin en una envoltura de polietileno. Esta envoltura contiene además cinta de aluminio como barrera contra la humedad, contribuye también a compensar los efectos producidos por variaciones de la temperatura.

La protección holgada protege la fibra durante la fabricación del cable, también la protege durante la instalación y operación. Permite alargamientos adicionales de la fibra sin que ésta forme curvas pronunciadas (Fig. III-13).

Las variaciones de longitud, mecánicas o térmicas del cuerpo del cable se transmiten a la protección secundaria, ésta puede ser un poco más larga o más corta que la fibra sin que esta última se comprima o se curve, los límites dependen del



1) Miembro central ( de  
acero o dieléctrico).

2) Polietileno.

3) Material protector -  
termoplástico (polipro-  
pileno).

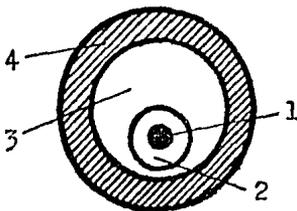
4) Fibra óptica.

5) Cinta de poliéster.

6) Cinta de aluminio -  
(protección contra la -  
humedad).

7) Envoltura exterior -  
de polietileno.

Fig. III-12. Cable de fibras con protección holgada. Las fi-  
bras están contenidas en tubos.



1) Fibra óptica.

2) Cubierta primaria (go-  
ma silicónica).

3) Espacio lleno de aire  
o de alguna protección -  
gelatinosa.

4) Tubo de plástico.

Fig. III-13. Esquema de una sola fibra con su protección.

diámetro interior de la protección secundaria y del paso del arrollamiento alrededor del alma del cable. Si este límite se rebasa y el tubo es demasiado corto la fibra adopta una forma curvada irregular, oprimiéndose contra las paredes del tubo.

Las microcurvaturas provocan una atenuación mayor y en casos extremos rotura de la fibra. Si el tubo se alarga demasiado, la fibra se distiende. Un alargamiento permanente o prolongado no debe ser mayor que una pequeña proporción de la tensión a que la fibra se somete durante las pruebas de fabricación, ello para evitar la fatiga estática. Cuando el cable se curva la fibra se alarga. Con un radio de curvatura de 50 mm la línea exterior de una fibra de 125  $\mu$ m de diámetro exterior se alarga aproximadamente 0.12%. Al instalar el cable deben por tanto evitarse curvas cerradas. Un cable de dimensiones correctas que contiene fibras con protección secundaria holgada, tiene una atenuación baja y estable en las fibras.

Cables sin partes metálicas.

Las redes urbanas no exigen por lo general cables sin componentes metálicas, aunque tales cables son preferibles en zonas expuestas a descargas atmosféricas, también son necesarias para líneas a centrales de fuerza y de transformación con altas tensiones.

Para estos casos el diseño del cable debe también satisfacer los requisitos sobre alivio de la tensión de tracción, estabilidad con cambios de temperatura y protección contra la humedad. Un cable de este tipo tiene un alma de fibras de vidrio como alivio central de fuerza de tracción y un relleno entre las fibras y la protección secundaria de un material hidrófugo de baja viscosidad.

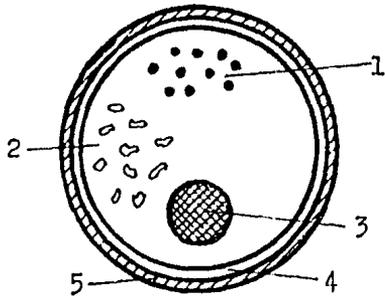
Cable con gran número de fibras (con protección holgada).

La aplicación de fibras ópticas en un sistema local (que sirva para telefonía, transmisión de datos, TV por cable, etc) requiere utilizar la estructura existente para la red telefónica. El elemento básico del cable consiste de un tubo de plástico en el que se colocan 10 fibras junto con un material de relleno (constituido por hilos de material suave y un compuesto gelatinoso de baja viscosidad). Ver la Fig. III-14.

Las 10 fibras son identificadas mediante colores antes de ser montadas en el tubo.

La distribución de estas unidades en el cable depende del número de fibras que se requieran. Se fabrican cables que contienen hasta 2000 fibras con un diámetro de 79 mm.

El cable lleva en su centro un elemento de refuerzo que puede ser de acero o de fibras de vidrio (FRP).



1) Fibra óptica (índice - gradual).

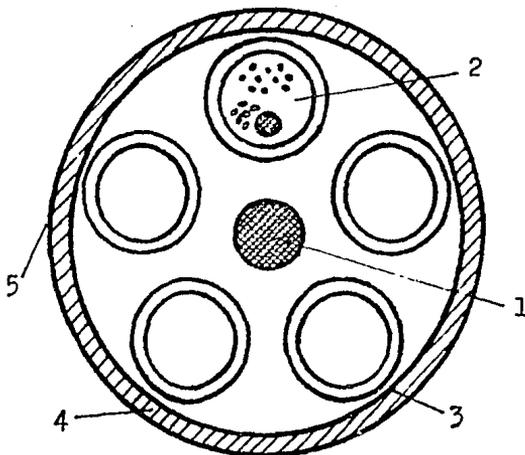
2) Relleno gelatinoso de baja viscosidad.

3) Hilos de material suave.

4) Tubo de plástico.

5) Armadura de fibra de vidrio.

Unidad básica del cable.



1) Elemento reforzador.

2) Unidad básica (10 - fibras ópticas).

3) Envoltura de polietileno.

4) Aluminio laminado - protección contra la humedad.

5) Envoltura exterior.

Fig. III-14. Cable con múltiples fibras con protección holgada.

Cables de fibras ópticas en cintas.

La estructura consta de una cinta con 5 orificios de forma circular o hexagonal. Las cintas pueden ser de plástico o de aluminio, si son de aluminio, éste es cubierto con una capa de polietileno. Estas cintas son colocadas en tubos de plástico (Fig. III-15).

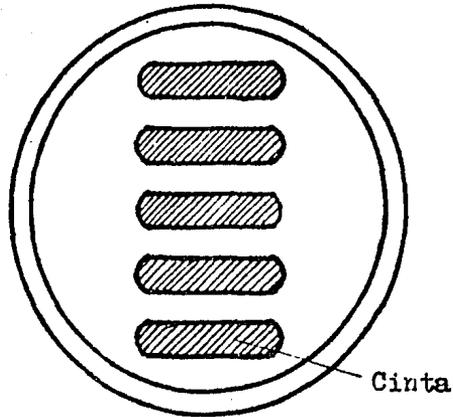
Cable de fibras ópticas en una estructura cilíndrica ranurada en V.

El cable consta de un elemento central de refuerzo, constituido de hilos de acero o de INVVAR (aleación de Níquel y Hierro), también puede ser de KEVLAR (fibra textil). Este tiene la finalidad de reducir los efectos de las fuerzas de tensión a que se ve sometido el cable.

Alrededor del miembro de refuerzo va montada una estructura cilíndrica ranurada de plástico (polietileno de baja densidad), que constituye la parte principal del cable.

El número de ranuras en el cilindro puede variar de acuerdo a las necesidades específicas de cada usuario, algunas de las ranuras pueden dejarse vacías.

Para su producción industrial, las estructuras cilíndricas ranuradas se han generalizado a 4 mm de diámetro con 10 ranu



Cable constituido por cintas.

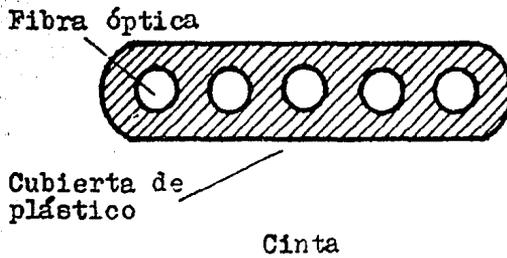


Fig. III-15. Cable de fibras ópticas en cintas.

ras.

Las fibras ópticas (con su protección primaria), se alojan libremente en las ranuras, esto les permite a las fibras un determinado margen de elongación. Ver Fig. III-16.

Las ranuras se maquinan en espiral, con una profundidad  $h$  y un determinado paso helicoidal, lo cual permite a las fibras mayor holgura y las libera de esfuerzos mecánicos.

La cubierta del cable está diseñada para disminuir los esfuerzos de tensión y compresión que actúan sobre las fibras, además deben ofrecer protección contra la humedad, estas cubiertas por lo general están compuestas de aluminio y polietileno.

#### CONECTORES.

Las condiciones que deben satisfacer los conectores son:

- Bajas pérdidas por conexión.
- Facilidad de montaje.
- Mínima variación en las pérdidas por conexión después de un gran número de conexiones.
- Máxima insensibilidad a factores ambientales (temperatura, polvo, etc.).

Se cuenta con diferentes tipos de conectores, se clasifican de acuerdo a su principio de operación.

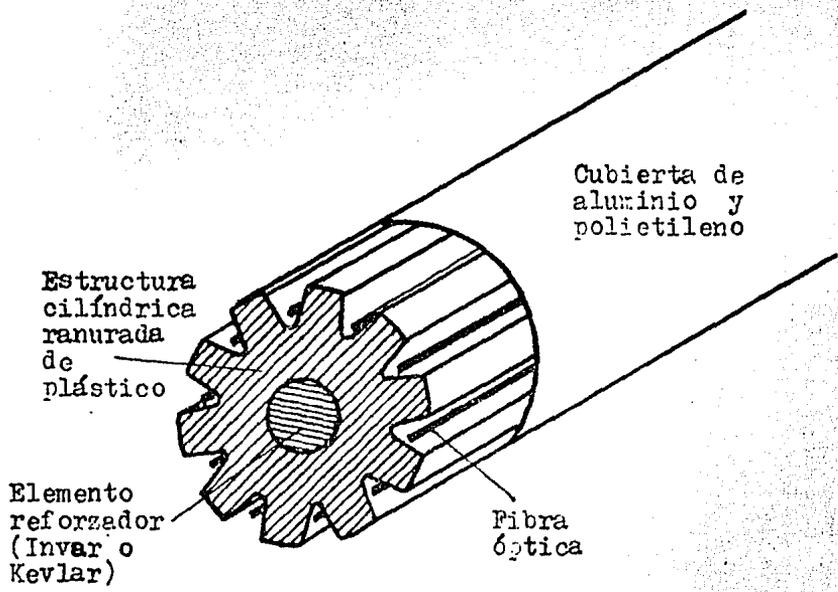


Fig. III-16. Cable de fibras en una estructura cilíndrica ranurada.

### Conectores de guía metálica.

Su principio de funcionamiento es muy sencillo, por lo cual su empleo se ha generalizado ampliamente.

El primer paso es la colocación de la fibra óptica en la guía metálica (Fig. III-17). Se desprende la cubierta plástica del extremo de la fibra, ésta se corta dejando un pequeño remanente, el cual es pulido en abrasiones sucesivas. Las dos terminaciones se introducen en las abrazaderas o guías metálicas. Posteriormente se coloca la envoltura y el barril sobre un conector. Se introduce la guía metálica del otro conector en la envoltura y se ajusta la tuerca acopladora sobre el barril.

El alineamiento de las guías metálicas y por ende de las fibras ópticas es ejecutado por la envoltura. El barril y las tuercas acopladoras se requieren para soportar las fuerzas de tensión.

### Conectores con guía de presión.

Este conector consiste básicamente en una guía metálica que ejerce presión sobre dos abrazaderas de diámetros diferentes, en éstas están montadas las fibras ópticas (Fig. III-18).

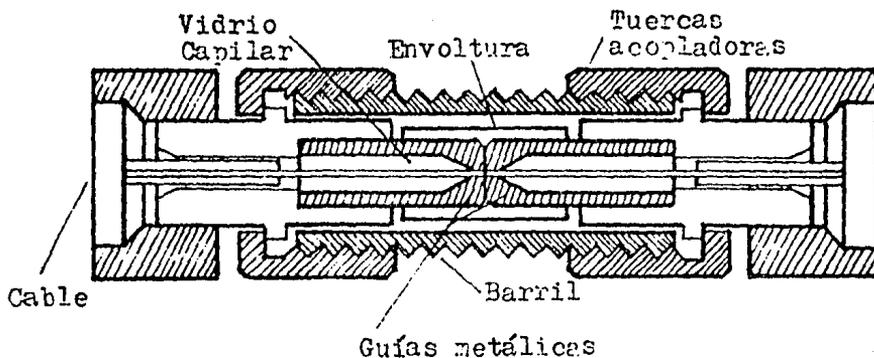


Fig. III-17. Conector de guía metálica.

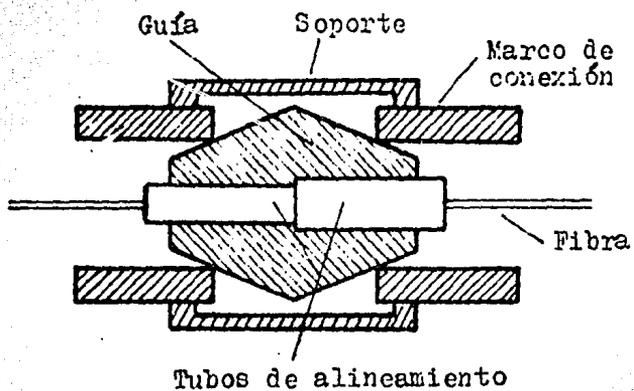


Fig. III-18. Conector por guía de presión.

Conectores por medio de una esfera de alineamiento.

Las fibras son montadas en los conectores, en forma similar a como se explicó en la parte correspondiente a los conectores de guía metálica. Ver la Fig. III-19.

Los conectores con las fibras ya instaladas se introducen y se ajustan con gran precisión en el interior de una minúscula esfera. Este conector requiere instrumentos de precisión para centrar a los conectores en la esfera.

Sistema para conexión de fibras ópticas por lentes esféricas.

Los conectores comunes para fibras ópticas colocan las terminales de las fibras en contacto directo.

Cuando las fibras no son alineadas correctamente, se incurre en pérdidas por acoplamiento y aunque generalmente son mucho menores que 1 dB, después de muchas conexiones la eficiencia del acoplamiento decrece rápidamente, para evitar esta se pueden utilizar conectores de lentes.

La Fig. III-20 muestra la estructura básica de estos conectores. En todos éstos la imagen de la fibra emisora es recibida en el corazón de la fibra receptora.

Este conector consiste de dos clavijas alfiler insertadas

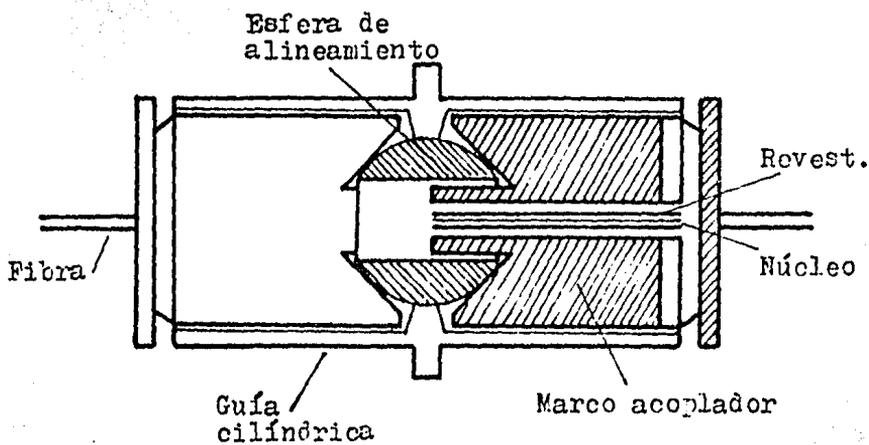


Fig. III-19. Conector mediante una esfera de alineamiento.

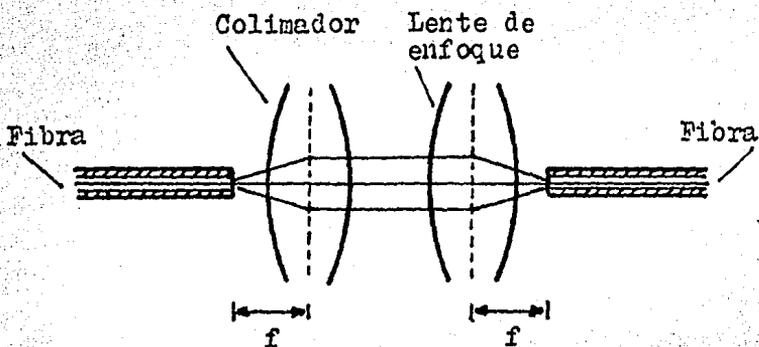


Fig. III-20. Sistema de conexión de fibras ópticas por medio de lentes esféricas.

dentro de una manga o envoltura (Fig. III-21).

La abrazadera interior tiene la finalidad de acomodar a la fibra con respecto a las lentes (lentes bola en este caso). - El ensamblamiento es como sigue: Se remueve la cubierta de la fibra, posteriormente la fibra es insertada dentro de un vidrio capilar con estrechas tolerancias, dicho vidrio es colocado a presión en la abrazadera interior.

Sobre la abrazadera interior se inserta otra exterior, las lentes son montadas en esta abrazadera.

Se ajusta mediante un cuidadoso alineamiento la distancia correcta entre las lentes y el extremo terminal de la fibra. Las dos clavijas alfiler con las fibras a ser unidas son alineadas por la manga o envoltura.

#### EMISORES LUMINOSOS.

Actualmente existen en servicio dos tipos de fuentes luminosas. La primera de ellas es una versión refinada de los diodos emisores de luz (LED), que se encuentran en las calculadoras. Para un sistema de comunicaciones óptico es necesario un LED de mayor intensidad luminosa y además que su diámetro sea comparable al de las fibras ópticas.

El otro tipo de fuente luminosa es el diodo láser semiconductor, el cual consiste de varias capas de material semicon-

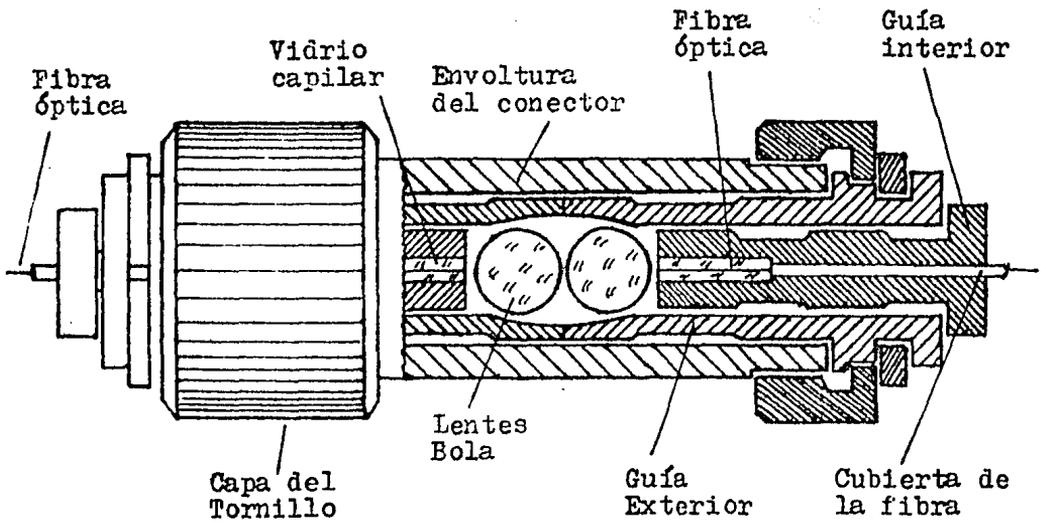


Fig. III-21. Conector de fibras ópticas por medio de lentes - esféricas.

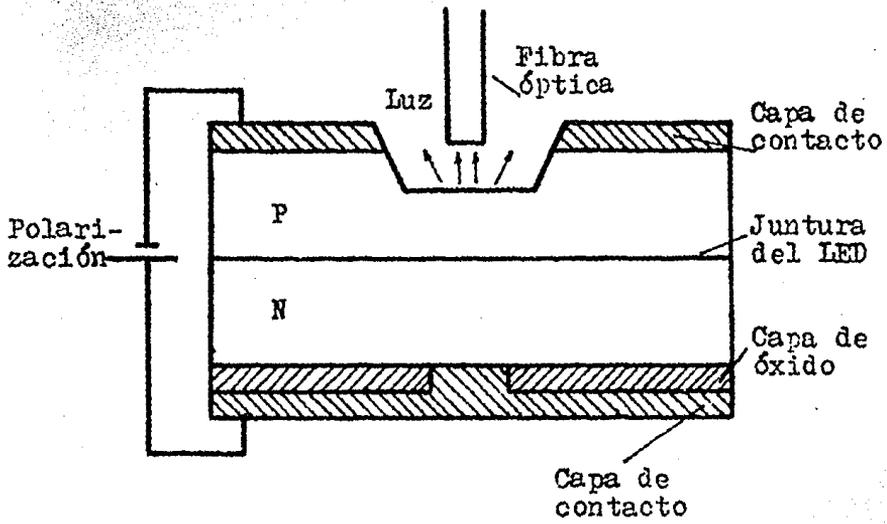


Fig. III-22. Estructura del LED.

El ancho espectral de emisión de un LED a temperatura ambiente en la región de 0.8 a 0.9  $\mu\text{m}$  es generalmente de 350 a 500  $\text{Å}$ .

El tipo de emisión de luz en los diodos emisores de superficie es aproximadamente lambertiano, es decir, la radianza es constante en todas direcciones.

### Láser semiconductor.

Las pequeñas dimensiones del láser semiconductor aunadas al rango de longitudes de onda de la señal emitida (región infrarroja del espectro electromagnético), hacen de este dispositivo un componente adecuado para los sistemas de comunicación que emplean fibras ópticas como líneas de transmisión.

#### Descripción del funcionamiento del láser semiconductor.

Para cualquier cristal semiconductor las leyes de la termodinámica imponen que el número de átomos (población), en el estado energético más bajo sea superior a la población en el estado energético más alto. Si este medio es excitado, algunos átomos situados en el nivel de energía más bajo (nivel fundamental), son transferidos a niveles energéticos superiores (niveles excitados), al cabo de un tiempo determinado, el átomo retorna a su estado fundamental, al hacerlo emite luz, con lo cual restituye la energía adquirida cuando fue excitado, -

esto corresponde al proceso clásico de emisión espontánea de luz, los diferentes átomos excitados se desexcitan independientemente los unos de los otros (Fig. III-23).

Cuando se tienen más átomos en un estado excitado que en el estado fundamental, se dice que se ha producido una inversión de población, teniéndose entonces una emisión de luz de otra naturaleza: Se trata de una emisión estimulada en la que bajo la influencia de una radiación excitadora, los átomos se desexcitan en forma coherente, es decir, radiando en fase y en la misma dirección un mismo cuanto de energía luminosa o fotón.

Para que se produzca una inversión de población se requiere un sistema que tenga más de dos niveles energéticos, cuando se cumple esta condición al excitar al dispositivo es posible disponer de un número mayor de átomos en el estado excitado 2, que en el estado 1. Produciéndose entonces una inversión de población entre los estados 1 y 2 (Fig. III-24).

El diodo semiconductor láser consiste esencialmente de una capa delgada de Galio-Arsénico (Ga-As), emparedada entre dos capas de galio-aluminio-arsénico (Ga-Al-As), ver la Fig. III-25. En ausencia de un voltaje aplicado, los electrones de conducción en la capa tipo n a un lado de la capa Ga-As, y los huecos en la capa tipo p en el otro lado, tienen aproximada--

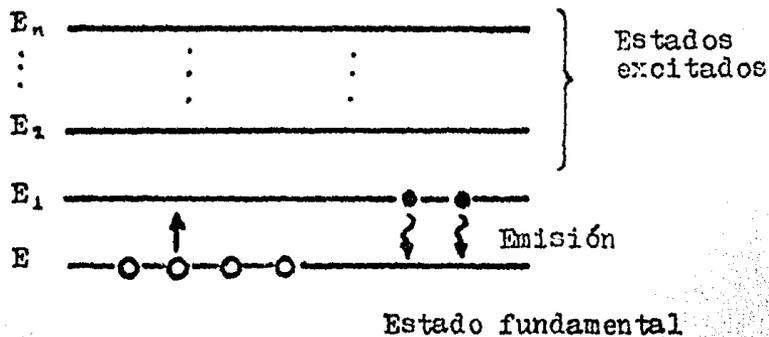


Fig. III-23. Emisión espontánea de luz.

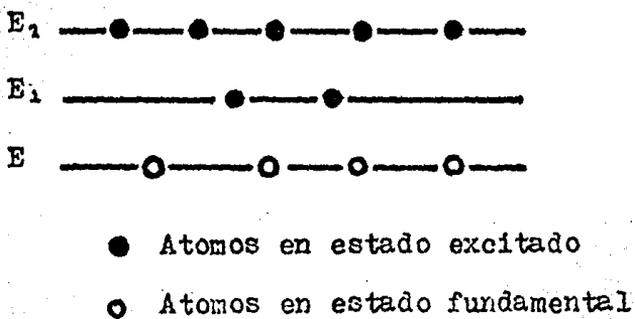


Fig. III-24. Inversión de población entre los estados 1 y 2.

mente la misma energía, pero están separados espacialmente.

Tanto los electrones como los huecos están impedidos para penetrar al interior de la capa Ga-As. La aplicación de un voltaje en directa al dispositivo, eleva la energía de los electrones en el lado tipo n, con respecto a la energía de los huecos en el lado tipo p. Así, el voltaje disminuye las barreras de potencial y de ese modo se permite a los electrones de la región tipo n y a los huecos de la región tipo p fluir al interior de la capa central Ga-As (Fig. III-26).

Por tanto los electrones están libres para saltar la banda prohibida de energía y recombinarse con los huecos en la banda de menor energía.

Por cada transición entre bandas (de la banda de conducción a la de valencia), se produce la emisión de un fotón.

La producción de un mecanismo de realimentación se consigue por la reflexión de las ondas luminosas en las hendiduras grabadas en la superficie del cristal. La amplificación de la luz es posible cuando un fotón incidente estimula la emisión de un segundo fotón.

La longitud de onda de la radiación emitida está determinada por la brecha de separación de energía de los electrones a los huecos.

El ancho espectral de un láser semiconductor es aproximada

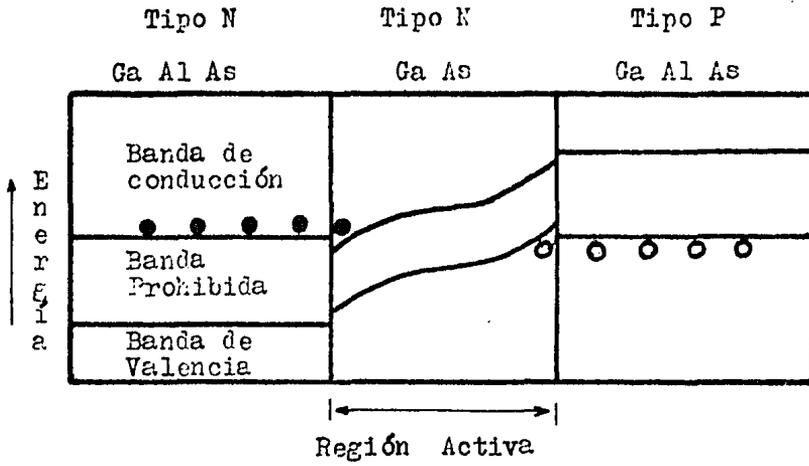


Fig. III-25. Láser semiconductor no polarizado.

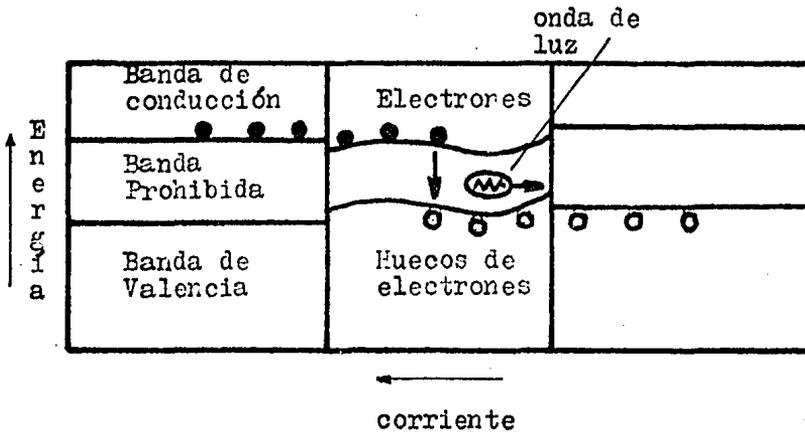


Fig. III-26. Láser semiconductor polarizado.

mente de 20 Å. Este reducido ancho espectral permite que el láser semiconductor pueda ser empleado para comunicación en enlaces largos.

La curva característica del láser semiconductor se encuentra en el siguiente capítulo.

#### RECEPTORES OPTICOS.

La función del fotodetector es la de transformar la señal luminosa en una señal eléctrica equivalente.

El principio básico de funcionamiento de los fotodetectores es el efecto fotoeléctrico, la luz incidente, considerada como pequeños paquetes de energía cuantificada o fotones, excita a los electrones de un determinado material, hasta un nivel en el cual éstos puedan producir una corriente eléctrica impulsada por un campo eléctrico.

Comercialmente existen dos tipos de fotodetectores: El fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha. La ganancia para el fotodiodo PIN es unitaria (un electrón por cada fotón), mientras que para el de avalancha la ganancia está entre 10 y 100.

#### Fotodetector PIN.

El término PIN denota que el detector consiste de una re--

gión intrínseca (i), emparedada entre capas de silicio envenenadas, tipo (p) y tipo (n). El tipo p, o tipo positivo es una capa de material con deficiencia de electrones, el tipo n, o tipo negativo es un material con exceso de electrones (Fig. - III-27).

Los fotones absorbidos en la región intrínseca del emparedamiento dan origen a electrones y huecos que se mueven bajo la acción de un campo eléctrico uniforme, para producir una corriente eléctrica.

La capa intrínseca puede estar ligeramente envenenada con impurezas tipo p.

#### Fotodiodo de Avalancha.

Los niveles de potencia óptica que recibe un fotodetector y por lo tanto los niveles de corriente que se generan son muy pequeños. Por ello muy susceptibles al ruido. Una manera de aumentar el nivel de la señal es incrementar la ganancia interna del fotodiodo.

En el fotodiodo de avalancha se generan pares hueco-electrón de la misma manera que en el fotodiodo PIN, pero éstos se ven multiplicados por una determinada ganancia. Esta multiplicación se debe a colisiones sucesivas en las que un portador genera nuevos portadores.

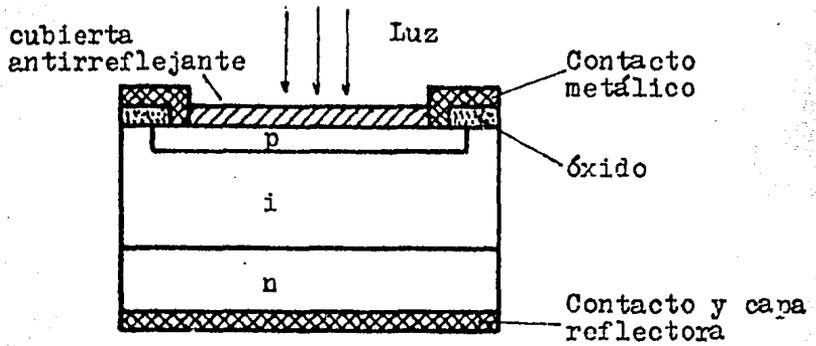


Fig. III-27. Fotorreceptor PIN.

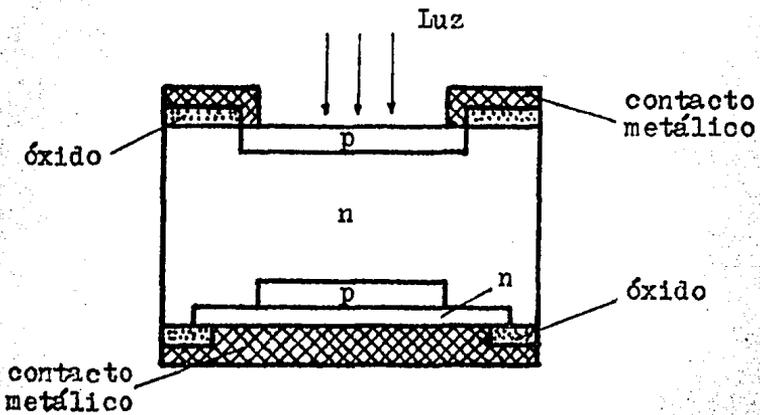


Fig. III-28. Fotorreceptor de avalancha.

A diferencia del fotodiodo PIN, el de avalancha incorpora una capa adicional de material tipo n (Fig. III-28).

## Capítulo IV

### APLICACIONES.

El campo de aplicación de las fibras ópticas es muy amplio, las encontramos principalmente como parte fundamental en sistemas de comunicación, pero también como elementos transmisores de imágenes.

#### LAS FIBRAS OPTICAS COMO MEDIO PARA LA TRANSMISION DE IMAGENES.

Por si mismas, las fibras ópticas no producen una imagen, sino que unicamente la transmiten desde un punto a otro.

Instrumentos como el endoscopio han sido desarrollados para examinar cavidades cerradas o internas de difícil acceso.

El endoscopio es un dispositivo óptico, compuesto por la combinación de dos manojos de fibras ópticas y por ciertos sistemas de lentes u objetivos de dimensiones micrométricas.

El hecho de que se hable de dos clases de fibras, significa que en el endoscopio se emplean, un haz de fibras flexibles con distribución irregular que tiene por objeto el transmitir luz a la región que se desee observar, y otro grupo de fibras también flexibles, las cuales presentan una distribu--

ción regular, las cuales se encargan de la transmisión de la imagen hasta el observador (Fig. IV-1).

Los actuales manojos de fibras transmiten una imagen con una resolución de 30 a 40 líneas/mm, tienen una longitud de 1 a 1.5 m y una transmisión de luz de 0.45 a 0.48 con una interpretación excelente en la transmisión del color.

#### APLICACIONES DE LAS FIBRAS OPTICAS EN MEDICINA.

Han pasado más de 100 años desde que un instrumento óptico especial fue usado para examinar el esófago y el estómago, -- (Kussmaul, en 1868).

Desde ese tiempo la endoscopia, basada en la inserción de un instrumento óptico dentro de la cavidad a ser examinada, -- ha sido uno de los métodos más exactos para diagnosticar enfermedades de órganos internos.

Para la iluminación de las paredes internas, se transmite, por medio de un haz no coherente de fibras, luz de alta intensidad. La imagen que se transmite a través del haz de fibras coherente, exige de éstas, altas cualidades en cuanto a la -- transmisión de luz (en longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.8  $\mu$ m, para la obtención de fotografías en color de alta calidad), y en cuanto al poder resolutivo.

El microobjetivo del endoscopio está dispuesto en un termi

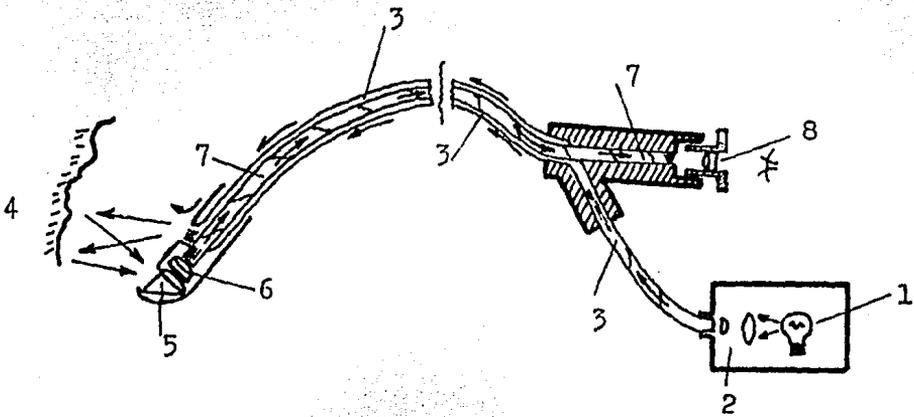


Fig. IV-1. Descripción del esquema del endoscopio.  
 1) Lámpara (luz fría); 2) Lentes; 3) Haz de fibras no coherente; 4) Objeto a observar; 5) Prisma; 6) Objetivo; 7) Manojó - coherente de fibras; 8) Ocular.

nal flexible en el extremo distal, lo cual le permite girar - un determinado ángulo, de tal forma que durante la observa-- ción no queden zonas sin examinar.

Cierto tipo de endoscopios tienen un dispositivo para prac-- ticar biopsias (examen de un trozo de tejido, tomado de un - ser vivo). El diámetro del endoscopio no excede los 10 mm.

El dispositivo que controla al objetivo y a las pinzas -- biópsicas se encuentra en el extremo exterior del endoscopio.

Estos aparatos están destinados para la inspección y foto-- grafía por medio de una cámara de televisión o fotográfica de órganos internos como son el esófago, el estómago, la vejiga, y aun el corazón.

#### ENDOSCOPIA TECNICA Y HOLOGRAFIA.

Un gran número de problemas asociados con la dificultad pa-- ra observar partes de estructuras que no pueden ser desmonta-- das, han sido resueltos mediante el uso de endoscopios de fi-- bras ópticas. Estos son empleados para inspeccionar canales - de rotores de turbinas, calderas, motores eléctricos, cámaras de combustión, detección de rupturas de engranes, etc.

La obtención de hologramas se basa en lo siguiente. La luz del láser es colimada al pasar a través de un sistema de len-- tes. El haz de rayos incide en el objeto que se desea fotogra--

fiar, la onda de luz reflejada por el objeto incide sobre la placa holográfica. Sobre esta misma placa incide el haz de rayos de referencia, o sea, parte de la luz del mismo láser reflejada por el espejo. Ver la Fig. IV-2.

La luz que se refleja en una fotografía lleva con ella información acerca de la irradiancia, pero ninguna acerca de la fase de la onda que emanaba del objeto. En efecto, si tanto la amplitud como la fase de la onda original se pudieren reconstruir, el campo de luz resultante (suponiendo que las frecuencias son las mismas), no se distinguiría del original. Esto significa que se vería (y se podría fotografiar) la imagen formada en una tridimensionalidad perfecta, exactamente como si el objeto estuviera generando en realidad la onda.

Por lo cual en la placa holográfica queda grabada la figura interferencial de la acción conjunta de los rayos llegados a través del objeto y de los rayos de referencia del espejo.

Después de revelada la placa fotográfica, prácticamente no se diferencia de una placa velada y desde el punto de vista óptico en ella no hay imagen. Pero si se conecta de nuevo el láser y se coloca el holograma habiendo quitado el objeto, podemos observar a través del holograma al objeto como si no hubiera sido quitado (Fig. IV-3).

El objeto observado tiene un aspecto al parecer real, varian-

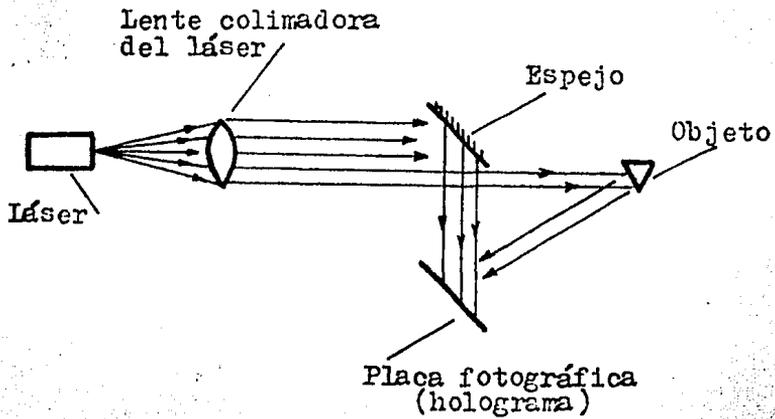


Fig. IV-2. Esquema elemental para la obtención de hologramas.

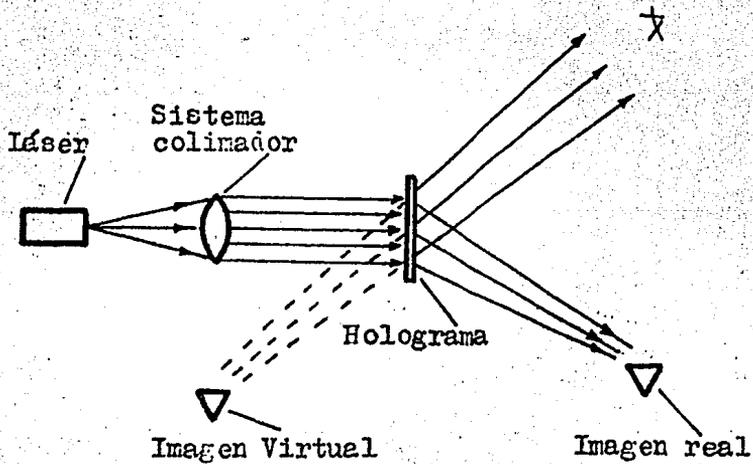


Fig. IV-3. Reconstrucción de la imagen grabada en el holograma.

do la posición de la vista se pueden ver las partes alejadas y cercanas del objeto, e incluso, algunas partes que no se ven desde una posición y son visibles desde otras.

Las fibras ópticas permiten simplificar en gran medida la construcción de interferómetros holográficos, utilizando en una de sus ramas o en ambas conductos fibrosos para la transmisión de luz. De esta forma disminuyen el número de elementos necesarios, las dimensiones y el peso del instrumento, aumentando su luminosidad. La ventaja fundamental de las fibras ópticas al ser utilizadas en la fotografía es el hecho que permite el estudio de objetos y cavidades de difícil acceso y la simplificación en la filmación de interferogramas de objetos bajo diferentes ángulos de fijación.

En la Fig. IV-4 se representa el esquema de obtención de hologramas empleando dos haces flexibles de fibras.

La radiación del láser se divide en dos haces mediante la placa divisora (espejo semiplataado), incidiendo la luz de referencia directamente sobre la placa fotográfica después de reflejarse en el espejo.

El haz de rayos de trabajo se dirige por medio de fibras ópticas al objeto y después de su reflexión por éste incide sobre la placa fotográfica a través de lentes (microobjetivo) y del segundo haz de fibras coherente, en esta placa luego de

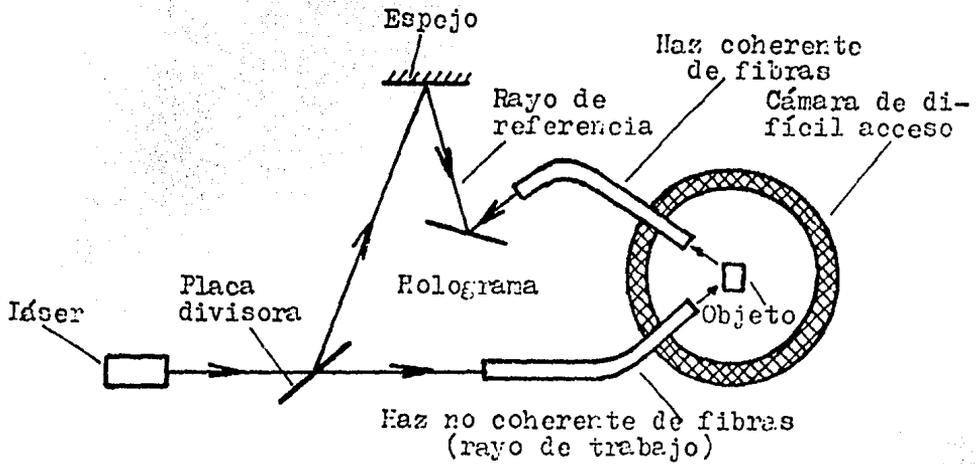


Fig. IV-4. Esquema del dispositivo que emplea dos manojos de fibras, para la obtención de hologramas.

la interferencia de los rayos de trabajo y de referencia se -  
obtiene el holograma del objeto.

## FIBRAS OPTICAS EN SISTEMAS DE COMUNICACION.

La transmisión de información a través de fibras ópticas - ha abierto nuevas posibilidades a la técnica de telecomunicaciones. Desde un principio era obvio que el ancho de banda característico de las fibras ópticas, junto con la baja atenuación que presentan, podrían permitir a éstas cubrir diferentes aplicaciones en los sistemas de comunicación.

### APLICACIONES DE FIBRAS OPTICAS EN TELEFONIA

En telefonía todavía se utilizan en algunos casos sistemas analógicos de modulación con multicanalización por división - en la frecuencia (FDM), pero su mercado está básicamente orientado a la utilización de sistemas PCM con multicanalización por división del tiempo (TDM). En ambos casos la utilización de las fibras ópticas es casi inmediata, pues son sistemas que requieren un aislamiento de las líneas de transmisión ante grandes niveles de ruido, además de altas capacidades de transmisión.

Actualmente se fabrican equipos fibroópticos de línea de - alta frecuencia para transmisión PCM. Principalmente se emplean en redes urbanas como enlace entre centrales locales.

Estos sistemas se han calculado para que puedan salvar sin

necesidad de amplificación intermedia 10 Km.

Los actuales sistemas ópticos presentan velocidades de --  
transmisión de 34.368 Mb/s (Europa) y de 44.736 Mb/s (EU).

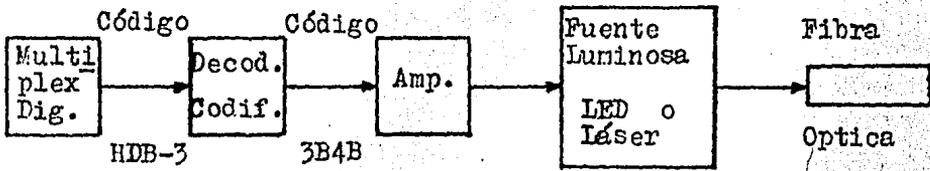
La Fig. IV-5 muestra el diagrama a bloques de un sistema -  
de comunicación digital por fibras ópticas.

Descripción del emisor.

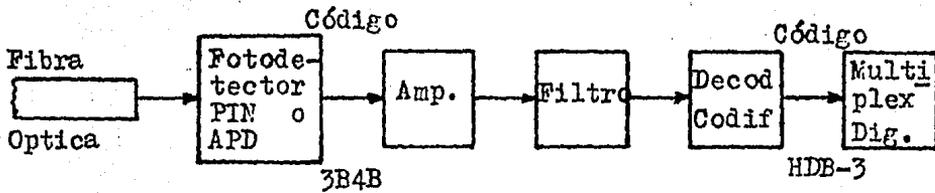
El primer bloque se refiere al equipo multiplex digital. -  
La señal bipolar en código HDB-3 (típico de un sistema PCM) ,  
procedente del interfaz de enlace digital, no es adecuada co-  
mo señal moduladora en el dispositivo óptico. Por lo cual, es  
ta señal se decodifica, convirtiéndose de nuevo a la señal bi  
naria original. Grupos de 3 bits de esta señal se codifican a  
una nueva señal binaria, la señal de línea. Para codificar es  
ta señal se ha elegido el código 3B4B.

Con este código la señal de línea tiene las siguientes ca-  
racterísticas: señal unipolar, valor medio constante, posibi-  
lidad de transmitir una señal de alarma, posibilidad de super  
visar errores en la señal y un diseño sencillo del codifica-  
dor.

Después de ser codificada, la señal pasa por una etapa de  
amplificación, para que su nivel de entrada al transmisor óp-  
tico sea el adecuado, dicho transmisor puede estar constitui-  
do por una de dos posibles fuentes luminosas, el diodo emisor



Lado Emisor



Lado Receptor

Fig. IV-5. Sistema de comunicación digital en telefonía.

de luz (LED) o el láser.

La emisión del LED es de tipo lambertiano o isotrópico, lo que significa que los rayos de luz son emitidos sobre un hemisferio completo. Esto provoca cierta ineficiencia en el acoplamiento del LED y la fibra óptica.

La respuesta de un LED es directamente proporcional a la corriente que pasa a través de la unión, de tal forma que el cambio en la potencia óptica de salida es fundamentalmente lineal para un cierto rango de corriente de entrada. Por lo mismo, se manifiesta como un dispositivo ideal para el uso de un sistema de amplitud modulada.

Dependiendo de sus características, un LED puede conmutar a velocidades mayores de 200 millones de pulsos por seg., aunque de hecho la tasa máxima de transmisión empleada actualmente es de 50 Mb/s.

La función de transferencia del láser semiconductor está caracterizada por un valor umbral, por encima del cual se emite el rayo láser. Esta característica varía con la temperatura y con el envejecimiento.

La señal de línea modula al láser dentro de la porción pendiente de su curva característica, para lo cual, la corriente de modulación se superpone a una corriente de polarización de intensidad cercana a la de umbral (Fig. IV-6).

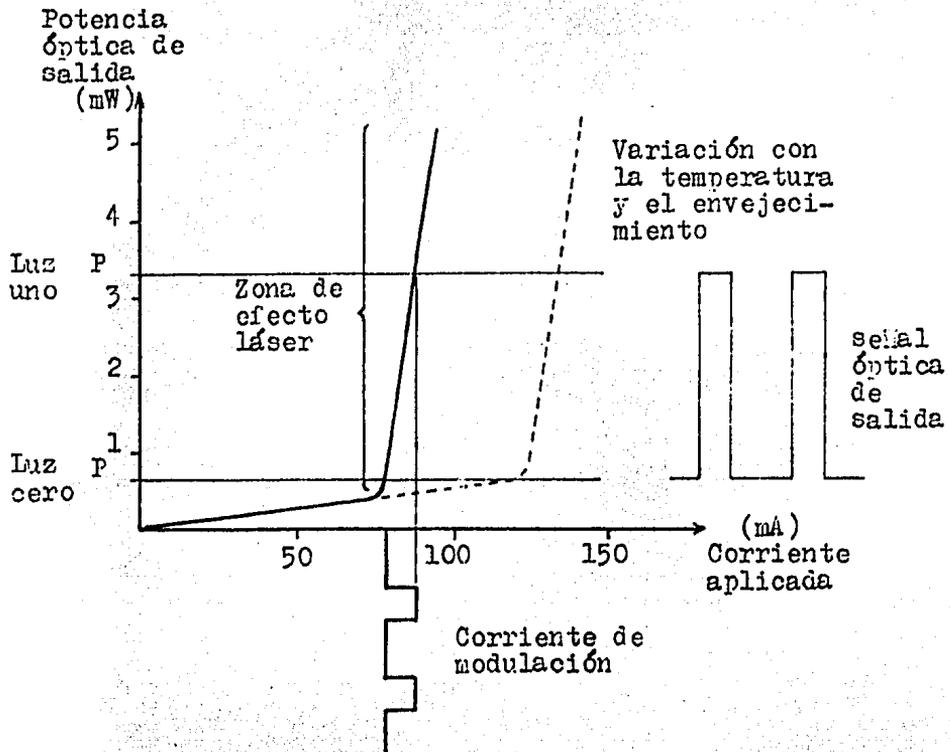


Fig. IV-6. Curva característica del láser.

La amplitud de la corriente de modulación y de la corriente de polarización, se regulan automáticamente para compensar variaciones en la curva característica de transferencia. Para ello se detecta la radiación de la superficie reflectora posterior del láser, con un fotodiodo PIN y se emplea como señal de regulación.

Una fibra provista con un lente para aumentar el grado de acoplamiento, conecta la radiación de la superficie reflectante anterior del láser al contacto fibroóptico del interfaz óptico.

La escasa anchura espectral del láser y el gran ancho de banda de la fibra de índice gradual, disminuyen significativamente la dispersión. Además el láser transmite a mayor velocidad que el LED, por lo cual se recomienda el uso del láser para sistemas que requieran altas velocidades de transmisión y que empleen modulación por pulsos.

Descripción del receptor.

El primer paso en la etapa de recepción del sistema es la recuperación de la información óptica transmitida, para luego ser decodificada.

Por lo cual es necesaria la conversión de la señal óptica incidente a una señal eléctrica. Para lograr esto existen dos tipos de fotodiodos, uno de ellos consiste en una unión PN --

con una capa intrínseca entre las regiones P y N, se conoce como diodo PIN, el otro se conoce como fotodiodo de avalancha (APD).

Cuando la energía luminosa transmitida a través de la fibra alcanza al fotorreceptor, provoca en éste un aumento del nivel de energía de los electrones en la unión. Por lo cual la resistencia de la juntura disminuye, permitiendo un flujo mayor de corriente a través de la unión.

Con el fotodiodo de avalancha se aumenta la sensibilidad de recepción por multiplicación interna de la corriente primaria, con lo cual se consigue una sensibilidad de 10 a 15 dB más grande que la que se obtiene con diodos PIN.

El proceso de multiplicación en los diodos de avalancha es aleatorio e introduce un ruido que aumenta con la ganancia. Esto implica que hay un valor óptimo de ganancia, el equipo receptor regula automáticamente el punto óptimo de trabajo, variando la tensión inversa al fotodiodo de avalancha.

La señal detectada se amplifica en una etapa de entrada con bajo ruido. Para ello se emplea una técnica de amplificación consistente en integrar primero la señal para posteriormente diferenciarla.

La señal amplificada pasa por un filtro paso bajas para conseguir la relación señal/ruido más alta posible en el pun-

to de decisión. El filtro compensa también la dispersión en la fibra.

En el receptor la señal se convierte de señal de línea (código 3B4R) a una señal binaria y ésta se codifica, transformándose en una señal bipolar (código HDB-3), recobrando la forma correspondiente al interfaz digital.

Descripción del equipo de amplificación intermedia.

En el equipo amplificador intermedio bidireccional se regenera la señal óptica. En cada sentido de transmisión la señal se detecta con un fotodiodo de avalancha, se amplifica, se filtra y se convierte en pulsos luminosos en el emisor óptico.

El cable óptico se conecta al interfaz óptico del amplificador intermedio con el mismo tipo de contacto que se emplea en el equipo terminal de línea.

El equipo amplificador está previsto para montaje en ambiente de estación y requiere alimentación de energía local. Tiene equipo para detectar fallas y para indicar estados de alarma.

Para supervisar el funcionamiento del sistema, en las terminales y en el amplificador intermedio hay varias alarmas. Estas se indican con diodos luminiscentes en el frente del equipo en cuestión. Una falla del sistema de alimentación de energía se detecta e indica por separado.

En el equipo terminal de línea se supervisan las siguientes funciones:

Intensidad alta de errores de bits, en la señal eléctrica emitida.

Ausencia de señal óptica en el detector.

Intensidad alta de errores de bits, en la señal óptica recibida.

Ausencia de señal eléctrica saliente.

En el equipo amplificador intermedio se verifican los siguientes parámetros por cada sentido de transmisión.

Intensidad alta de errores de bits en la señal óptica recibida.

Ausencia de señal óptica de salida.

#### APLICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS EN LA TRANSMISION DE DATOS.

Las fibras ópticas pueden dar solución a muchos problemas de diseño de sistemas para transmisión de datos.

La transmisión de datos consiste en el intercambio de información codificada, por medio de señales eléctricas, entre máquinas terminales remotas o computadoras.

La característica fundamental de este servicio es la gran velocidad a la que fluye la información. Los objetivos primor

diales de un sistema transmisor de datos son:

La simplicidad en la instalación y en la operación, así como una baja probabilidad de error ( $P_e < 10^{-9}$  a 10 Mb/s).

Descripción del transmisor.

La señal proveniente de la computadora es de corriente continua pulsante, esta señal no es adecuada para modular al sistema óptico, por lo que se requiere de un dispositivo que la transforme en una señal de línea que active adecuadamente la fuente luminosa, dicho dispositivo es un decodificador-codificador (Fig. IV-7).

Descripción del receptor.

El flujo óptico es convertido por un fotodiodo PIN a una señal eléctrica, la cual es amplificada. Posteriormente esta señal de línea es modificada para que pueda ser registrada por el equipo terminal de la computadora (Fig. IV-7).

Configuraciones de Sistemas Transmisores de Datos.

El arreglo simple (Fig. IV-8) permite la transmisión de datos en una sola dirección, el sistema debe incluir verificadores de errores como serían los bits de paridad. El arreglo doble requiere dos pares transmisor/receptor (T/R) y dos cables. Permite la transmisión de datos en ambas direcciones simultáneamente.

En un momento dado, la estación 1 puede estar transmitien-

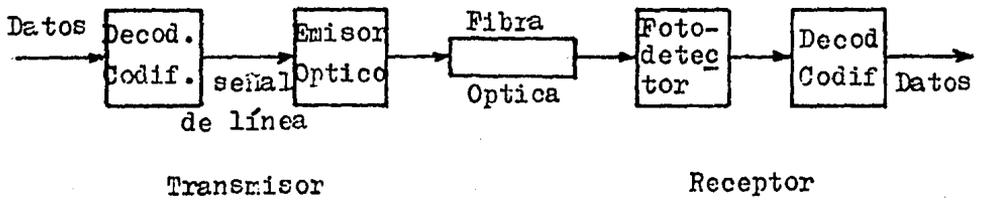


Fig. IV-7. Diagrama a bloques de un sistema transmisor de datos.

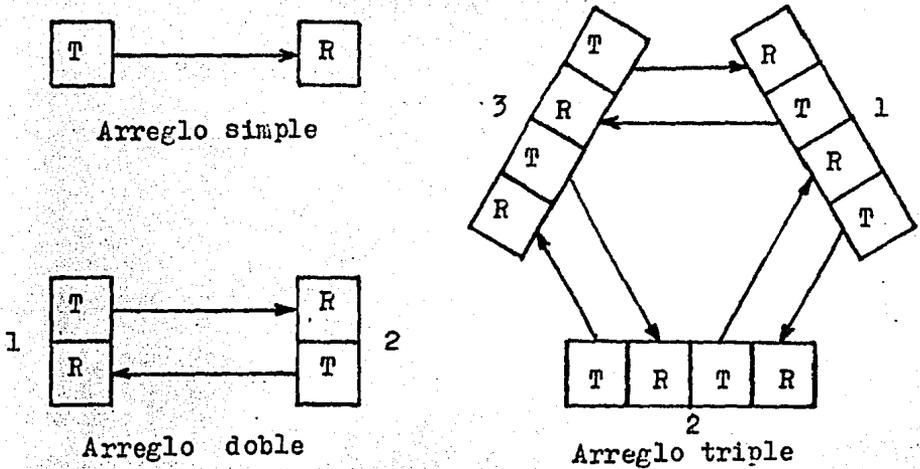


Fig. IV-8. Configuraciones de sistemas transmisores de datos.

do, la transmisión de retorno de la estación 2 puede no estar relacionada a la información emitida por la estación 1, pero pudiese también ser una retransmisión de los datos recibidos por la estación 2, así pues un retardador lógico y un circuito comparador en la estación 1 puede verificar errores y permitir correcciones.

Lo mismo se cumple para el arreglo triple. El aumento del número de estaciones es posible, pero el número de pares T/R, se incrementa rápidamente. Así, se tendrán  $n(n-1)$  pares T/R - por  $n$  estaciones.

Estos enlaces pueden aplicarse para comunicar unidades del sistema de computación, ya sea en gabinetes adyacentes o distribuidos por todo el local. Puesto que las distancias son pequeñas, puede seleccionarse un diodo LED como emisor y un fotodetector PIN.

## APLICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS EN LA TRANSMISION DE VIDEO. —

La transmisión de video se ha simplificado considerablemente con el sistema óptico basado en las fibras ópticas.

### Sistema Analógico de Televisión.

Aunque la tecnología de fibras ópticas se ha encaminado ha

cia la transmisión de señales digitales, también tiene la posibilidad de utilizarse con señales analógicas. Puede pensarse que es más conveniente digitalizar la señal analógica, con el fin de evitar problemas de atenuación o distorsión en la señal, por efectos del ruido, sin embargo, desde el punto de vista económico resulta más atractiva la eliminación de los conversores analógico-digitales y viceversa, así como también la disminución de los costos de multicanalización en el sistema.

Es por ello que se ha acudido a los sistemas analógicos para la transmisión de televisión por cable óptico, desgraciadamente la no linealidad de los componentes del sistema es una de las principales limitantes de este medio de comunicación.

#### Descripción del transmisor.

La señal de video de entrada pasa a través de un filtro cuya respuesta es plana en una banda de frecuencias de 6 MHz.

La señal de video se combina con las dos portadoras de audio en el amplificador de entrada al modulador (Fig. IV-9). El cual consta de dos osciladores controlados por voltaje y un mezclador en el que se produce una señal de frecuencia intermedia (FI) de 35 MHz. Los osciladores están compensados en temperatura. Todos los armónicos de la señal de FI y otras componentes espurias, se eliminan mediante un filtro paso ba-

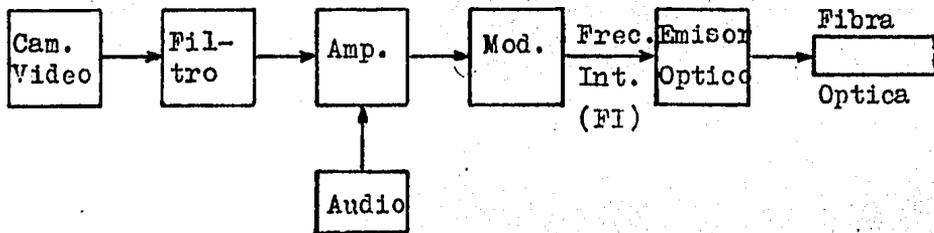


Fig. IV-9. Diagrama a bloques del transmisor de un sistema de televisión analógica.

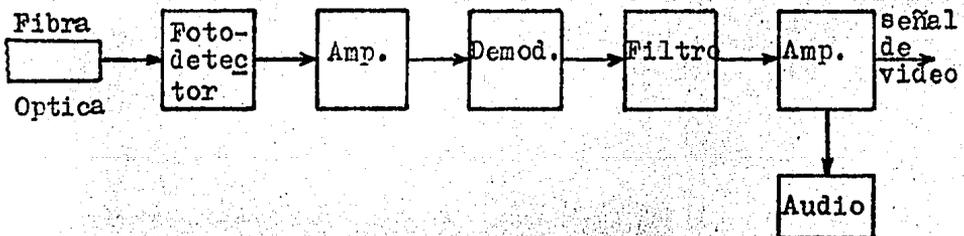


Fig. IV-10. Diagrama a bloques del receptor de un sistema de televisión analógica.

jas.

La señal de FI se amplifica y se utiliza para modular un láser de onda continua. La señal luminosa del láser se acopla a una fibra óptica para ser guiada hasta el conector óptico.

La luz procedente de la cara trasera del láser, se utiliza para controlar la potencia de salida y supervisar la operación.

En vez del láser puede utilizarse un LED. Cuando se utiliza éste, la potencia de salida es de unos 16 dB más baja que con el láser, lo cual junto con la mayor anchura espectral de la luz emitida, limita el alcance a un máximo de 3 Km.

La luz se transmite por una sola fibra óptica hasta el equipo receptor. La fibra empleada es de índice gradual.

#### Descripción del Receptor.

La señal luminosa de entrada se acopla a un fotodetector PIN, a través de un conector óptico y un tallo de fibra. La corriente resultante es amplificada (Fig. IV-10).

Para aplicaciones de larga distancia se utiliza un fotodiodo de avalancha, en este caso un circuito sensible a la temperatura y al nivel de la señal recibida, ajusta automáticamente el voltaje de polarización, para obtener una ganancia de avalancha óptima.

La señal amplificada se demodula y la señal de video resul

tante, pasa por un filtro para posteriormente ser amplificada. Este amplificador tiene dos salidas independientes, una para la señal de video y la otra para las portadoras de audio.

#### Sistema de alarmas.

Tanto el transmisor como el receptor están provistos de varias señales de alarma para facilitar su empleo y para la localización rápida de fallas.

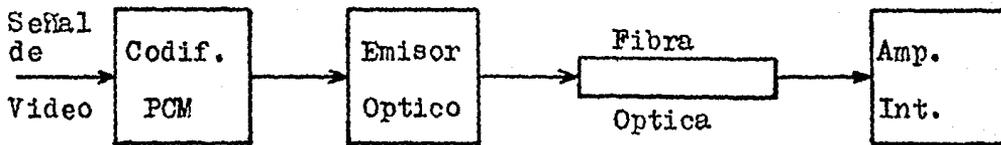
#### Sistema Digital de Televisión.

El sistema se basa practicamente en el muestreo de la señal analógica, la cual se codifica digitalmente, para que así pueda ser transmitida a través de la fibra óptica.

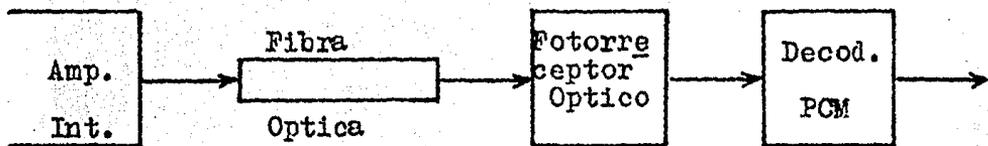
El sistema transmisor de video consta de un codificador y decodificador PCM, de conversores electrónico-ópticos y de un repetidor intermedio (Fig. IV-11).

El código de transmisión es unipolar. Se puede emplear tanto un LED como un láser como fuente luminosa, como fotodetector se emplea de preferencia un fotodiodo de avalancha de Silicio y fibra óptica de índice escalonado.

Otra aplicación interesante es la realización de una red interactiva de video, que permita la comunicación por televisión entre un abonado y otro, o entre un abonado y una central, tal y como se muestra en la Fig. IV-12, lo cual permite



Transmisor



Receptor

Fig. IV-11. Diagrama a bloques de un sistema digital de televisión.

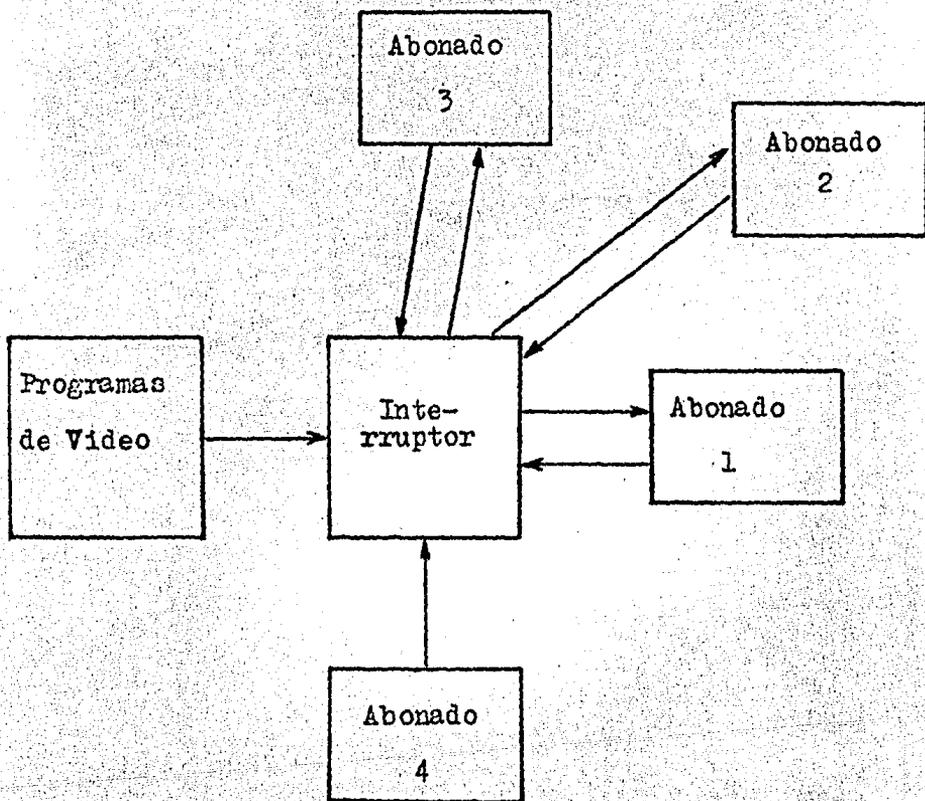


Fig. IV-12. Red interactiva de video.

la posibilidad de ofrecer diversos servicios.

## APLICACIONES DE LAS FIBRAS OPTICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

Las estaciones y subestaciones eléctricas requieren de medios efectivos de comunicación para un adecuado funcionamiento. Principalmente en aspectos como:

Los datos referentes al estado de la red, la información para el control de la planta de generación y transmisión, la utilización de códigos de protección para operar los circuitos de interrupción, la detección de fallas, etc.

El sector eléctrico emplea diferentes sistemas de comunicación, tales como:

El sistema Oplat (onda portadora en líneas de alta tensión) y la transmisión de señales de radio en banda UHF.

Pero estos sistemas se encuentran altamente afectados por el ruido producido por las líneas de alta tensión.

Las características de las fibras ópticas como son:

Su alta inmunidad a la interferencia electromagnética, su aislamiento dieléctrico y su resistencia a elevadas temperaturas. Lo anterior hace de las fibras ópticas un adecuado canal de transmisión para la comunicación entre subestaciones eléctricas.

En el diseño del cable óptico aéreo, para líneas de alta - tensión, se deben tomar en cuenta las difíciles condiciones - de operación a que va a estar expuesto. Puesto que los claros entre torres son por lo general mayores de 100 m y las condiciones ambientales de las zonas donde han de operar pueden - variar mucho.

Se cuenta con tres diseños diferentes, los cuales son:

Cable unido a mensajero, cable autoportado y cable interconstruido.

El cable unido a mensajero tiene la ventaja de permitir un adecuado tensionado del cable óptico, de acuerdo a las condiciones de carga o de deslizamiento.

El problema más importante es asegurar la igualdad de elongaciones para el cable mensajero y el óptico, con el fin de evitarse tensiones excesivas en los puntos de amarre. Otro aspecto a tomar en cuenta es la incidencia de descargas atmosféricas sobre el cable mensajero, lo cual puede dañar al cable óptico, si éste no posee una adecuada protección (Fig. IV-13).

El cable autoportado al agregarse a los cables de línea ya instalados, puede causar sobrecargas mecánicas en algunos tramos sobre las torres.

Para disminuir este problema se ha desarrollado un cable - de tipo dieléctrico, aunque para los claros que normalmente -

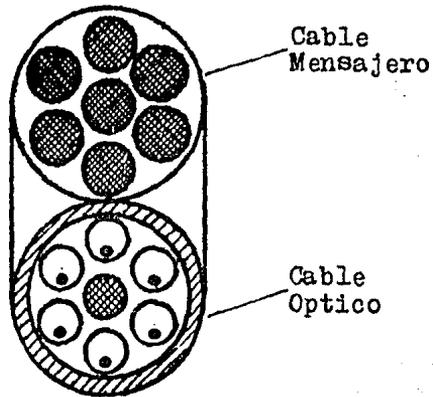


Fig. IV-13. Cable óptico unido al cable mensajero.

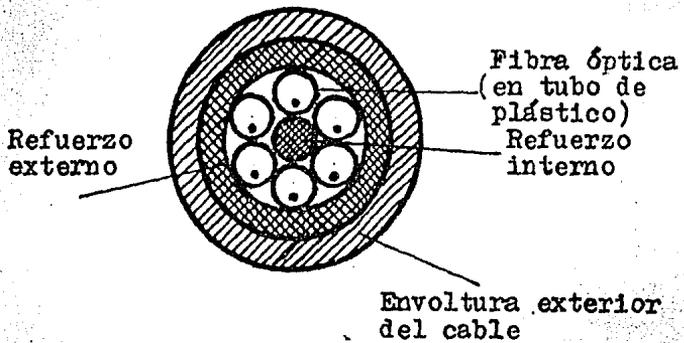


Fig. IV-14. Cable autosoportado.

se requieren en las líneas de alta tensión no se han obtenido buenos resultados, sobre todo por los efectos de galopeo y vibraciones producidas por el viento (Fig. IV-14).

El cable interconstruido tiene la ventaja de cumplir las funciones de un cable de potencia (conductor de fase o cable de guarda) y las de un cable de telecomunicación.

El cable óptico se encuentra contenido prácticamente dentro del cable de potencia, evitándose así las modificaciones en las torres para la instalación de un cable adicional.

Las características mecánicas del cable conductor y del elemento de refuerzo central del cable óptico, permiten a las fibras ópticas cierta holgura en el margen de elongación.

En forma experimental se han instalado algunos tramos de cable de guarda conteniendo en su interior fibras ópticas, empleando estructuras de fibras libres en tubos y en elementos cilíndricos ranurados.

La tendencia de dichos diseños es el cumplir con las especificaciones propias de un cable conductor ya sea de fase o de guarda, de manera que su instalación en las líneas ya existentes sea inmediata (Fig. IV-15).

APLICACIONES DE LAS FIBRAS OPTICAS EN INSTALACIONES SUBMARINAS.

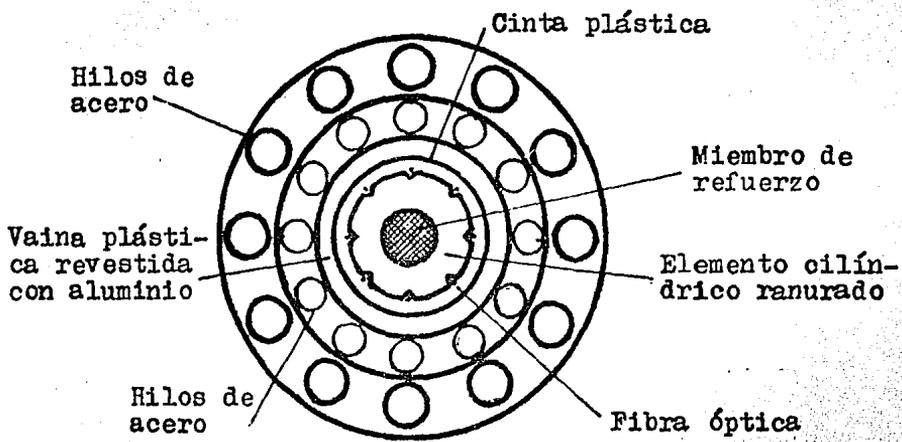


Fig. IV-15. Cable interconstruido.

### Cable Submarino Intercontinental.

Se espera que la aplicación de las fibras ópticas en un cable submarino reporte grandes beneficios en el aspecto de las comunicaciones.

Se considera que en 1968 será construido el primer cable óptico submarino transcontinental, el cual tendrá una fuerte competitividad con los enlaces via satélite.

Con el objeto de resistir las grandes presiones hidráulicas en el fondo del mar y los esfuerzos de tensión durante las maniobras de instalación, se requiere de una fuerte protección mecánica.

El elemento principal del diseño es el tubo metálico que contiene a las fibras ópticas. Dicho tubo debe soportar grandes presiones y además permitir la conducción de energía eléctrica con el fin de telealimentar a los repetidores, proporcionando un canal de comunicación de emergencia.

Cable submarino de fibras ópticas e hilos de cobre, para el control y alimentación de un vehículo no tripulado.

La tendencia actual en la investigación de yacimientos submarinos está cambiando, de la simple excavación de pozos petroleros, a la investigación y extracción de diversos minerales a profundidades que van de los 2000 m a los 6000 m.

Así como también en la investigación de temblores de tie--

rra y de otras actividades tectónicas.

Para la operación a estas profundidades de vehículos no tripulados, se requiere de la transmisión de la imagen captada por las cámaras de televisión submarinas, del estudio de la información obtenida a través del sonar, de la transmisión de las señales de control al vehículo y del suministro de energía eléctrica del barco al vehículo no tripulado.

De lo anterior se puede ver que el cable que ha de conectar al vehículo no tripulado con el barco, debe transmitir las señales de control y de información (señales de televisión), así como también la energía eléctrica. Para lo cual se ha desarrollado un cable compuesto de hilos de cobre (encargados de conducir la energía eléctrica), y de fibras ópticas (transmisión de la información y de las señales de control).

Este cable puede operar perfectamente a una profundidad de 2000 m. El cable consta de 3 líneas trifásicas, encargadas de la conducción de energía eléctrica y de 6 fibras ópticas, empleadas para la transmisión de las señales de control del barco al vehículo, y de la transmisión de la información captada por el vehículo, de éste al barco.

Características del cable.

Ligereza y tamaño reducido, para permitir la maniobrabilidad del vehículo no tripulado.

La baja atenuación de las fibras ópticas evita la necesidad de repetidores a lo largo del cable. No hay inducción de ruido en las fibras a causa de las líneas trifásicas.

#### APLICACION DE FIBRAS OPTICAS EN UN CONTROL AUTOMATICO DE FERROCARRIL.

Los trenes deben recibir entre otras informaciones, las siguientes:

El estado de la vía, la localización y velocidad de los trenes que corren por la misma vía, datos de los cruceros, etc.

La saturación de las vías ferroviarias hace necesario un estricto control de los trenes que corren por ellas. Dicho control suministra información a la locomotora, por medio de un transmisor de onda corta, el cual se encuentra montado en la vía, entre los rieles. El transmisor es energizado por el paso del tren (Fig. IV-16).

La información llega a este transmisor a través de cables, colocados a lo largo de la vía (el cable va montado sobre uno de los rieles).

Debido al severo electromagnetismo en el medio ambiente la longitud del cable está limitada a menos de medio kilometro.

Pero el incremento de las demandas de seguridad, especial-

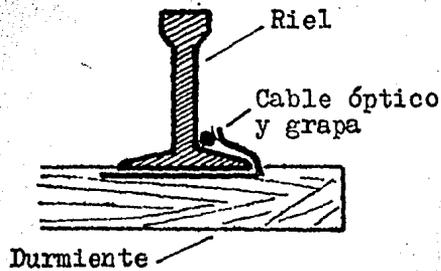
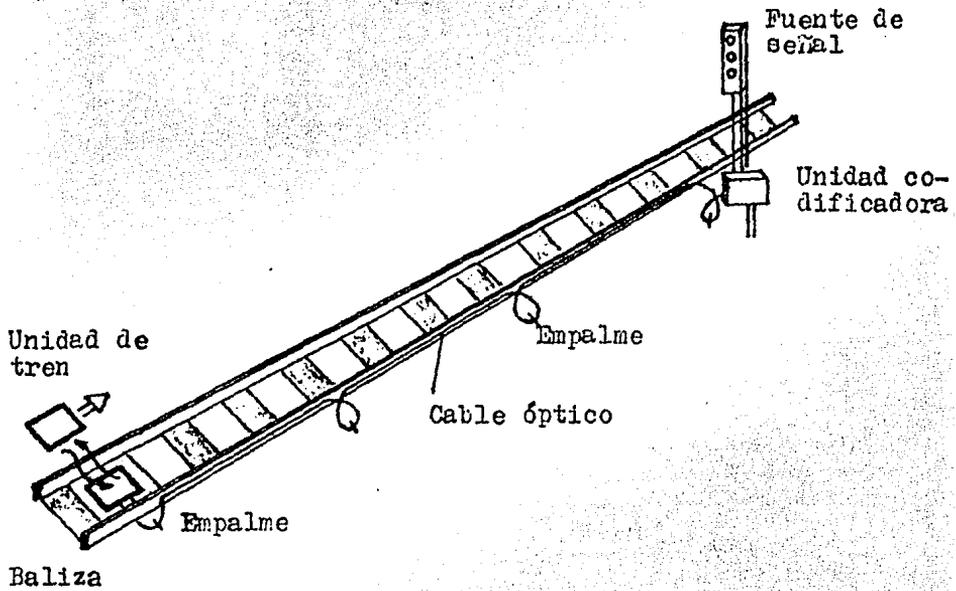


Fig. IV-16. Control automático de ferrocarril usando fibras - ópticas.

mente para trenes de alta velocidad, requiere secciones más largas con buena calidad de transmisión.

La solución obvia es el uso de enlaces de fibra óptica para la transmisión entre la fuente de información y el transmisor. Además de incrementar la distancia de transmisión, el nuevo enlace lleva ventaja en lo que se refiere a dimensiones (un diámetro mucho menor y por ende menor peso) y en su alta resistencia ambiental.

El nuevo enlace de información por fibras ópticas permite distancias superiores a los tres kilómetros, usando únicamente una fibra para la transmisión de toda la información necesaria.

El sistema consiste de las siguientes partes:

La unidad codificadora, la cual recibe información de una estación de control. Dicha información es codificada para ser transmitida a través de la fibra, empleando un LED como fuente emisora.

El otro extremo de la fibra está conectado a un fotorreceptor óptico. Después de transformar la señal óptica en una señal eléctrica, ésta es aplicada a un transmisor de onda corta, el cual transmite la información que ha de registrar la unidad receptora del tren.

El sistema también puede funcionar en sentido inverso, es

decir permite que el tren transmita información hacia la unidad codificadora.

La tabla IV-1 muestra el grado de aplicación de las fibras ópticas en los diferentes sistemas de comunicación.

Aplicación	Porcentaje
Telefonía	70 %
Transmisión de datos	3 %
Televisión por cable	10 %
Sist. Elect. de Potencia	3 %
Militar	10 %
Sistemas de control	3 %
Otros	1 %

Tabla IV-1. Porcentajes de aplicación de las fibras ópticas - en diferentes Sistemas de Comunicación.

## Capítulo V

### PERSPECTIVAS

#### VENTAJAS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

En las fibras ópticas las señales son transmitidas en forma de paquetes de energía (fotones), los cuales no tienen carga eléctrica. Consecuentemente es físicamente imposible que campos eléctricos (producidos por rayos, altos voltajes, etc) o campos magnéticos (producidos por máquinas eléctricas, ciclotrones, transformadores, etc.) afecten la transmisión.

La protección aislante sobre las fibras ópticas evita que el flujo luminoso escape hacia el exterior y a su vez la protege de interferencias ocasionadas por la luz externa. Por lo cual la información transmitida está a salvo de detección externa.

#### COMPARACION CON OTROS SISTEMAS DE COMUNICACION.

El gran ancho de banda de las fibras ópticas es una de las principales ventajas de éstas con respecto a otros canales de transmisión como son el cable coaxial y el par telefónico.

Otras ventajas de la transmisión por cable óptico en comparación con los cables metálicos son resultado de las propiedades

des dieléctricas de las fibras. Una de éstas es la inmunidad al ruido, y otra, las señales ópticas en el cable no provocan radiación electromagnética, además de que permite eliminar - las conexiones a tierra propias del cable coaxial.

El nivel energético de las señales transmitidas a través - de las fibras es aproximadamente de  $100 \mu W$  como máximo. Tales niveles, son radiológicamente seguros y en el caso de una ruptura o daño del cable, el flujo que escapase es inofensivo -- aun en ambientes explosivos, donde una chispa de un conductor metálico sería desastrosa.

El poco peso del cable óptico, así como su reducido diámetro, en comparación con las dimensiones de los cables metálicos de igual capacidad son otras ventajas importantes, sobre todo cuando se instalan en ductos saturados, además la mayor flexibilidad del cable óptico con respecto a uno metálico facilita la instalación.

Otra ventaja de las fibras ópticas es su resistencia a elevadas temperaturas y a la corrosión.

#### COMPARACION CON OTROS SISTEMAS DE COMUNICACION EN DIFERENTES APLICACIONES.

Las ventajas y desventajas de un sistema óptico en telefonía se pueden determinar en función de las distancias de los

enlaces:

Para enlaces a corta distancia (menores de 1 Km), la fibra difícilmente compite con los sistemas convencionales.

A media distancia (mayor de 1 Km y menor de 30 Km), la combinación capacidad - distancia, favorece en costo a la fibra óptica con respecto al cable coaxial y al cable de cobre multipar.

Para larga distancia (mayor de 30 Km), el requerimiento de repetidores hace que la tecnología actual de las fibras ópticas no sea lo suficientemente competitiva con los enlaces de microondas que se encuentran actualmente en uso.

En lo que se refiere al uso de cable coaxial para la transmisión de canales de televisión, éste resulta todavía muy atractivo comparado con los sistemas de fibra óptica, principalmente debido al reducido número de canales (8), que actualmente esta tecnología puede manejar, en comparación con los 50 canales que maneja el cable coaxial.

#### TENDENCIAS ECONOMICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

Los sistemas fibroópticos deben ser competitivos económicamente en comparación con otras alternativas, y el costo del cable representa en muchos casos una considerable partida.

El precio de las fibras está en función directa de los vo-

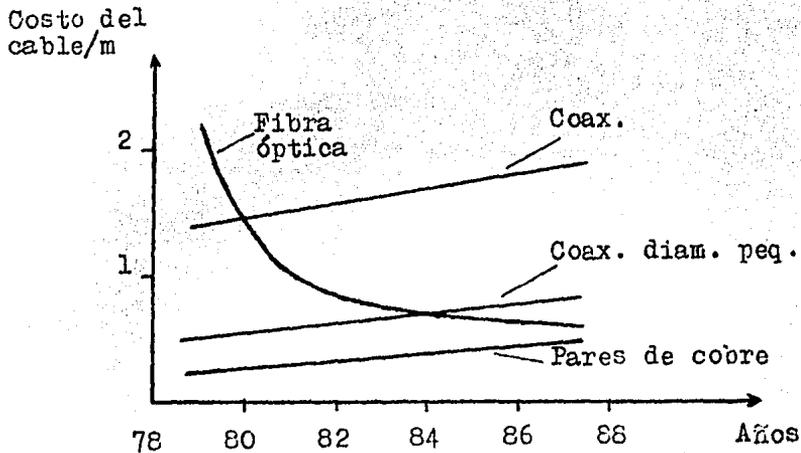


Fig. V-1. Comparación del precio de la fibra óptica con respecto a otros canales de transmisión.

lúmenes de producción. Conforme se logre un abatimiento de los costos de fabricación de las fibras ópticas, se obtendrá una mayor competitividad con los sistemas que emplean hilos de cobre, sobre todo si se considera que los costos de este metal tienden al alza. La misma situación se presenta con los sistemas que emplean cable coaxial.

La reducción de los precios del cable de fibras ha sido radical durante los últimos años (Fig. V-1).

#### PERSPECTIVAS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

La mayor parte del mercado de las fibras ópticas se ha en-

focado al sector de telecomunicaciones, dicha demanda ha surgido como una necesidad de medios de comunicación con mayores posibilidades de expansión, no sólo en cuanto a volúmenes de información o velocidad de transmisión, sino también en lo que respecta a medios alternativos de comunicación, como son transmisión de datos para enlaces interurbanos entre computadores, o la transmisión de canales de video, todo ello en la misma línea óptica, a través de los diferentes métodos de multicanalización disponibles.

Para conseguir lo anterior se cuenta a nivel experimental con fibras ópticas de índice gradual que trabajan con una longitud de onda de  $1.3 \mu\text{m}$ , las cuales presentan una atenuación de  $0.7 \text{ dB/Km}$  y un ancho de banda de  $1200 \text{ MHz-Km}$ . La baja atenuación y mínima dispersión de este tipo de fibra permitirá enlaces de más de  $40 \text{ Km}$  sin necesidad de repetidores. Una forma alternativa son las fibras de doble ventana de emisión, con valores de atenuación de  $2.4 \text{ dB/Km}$  para una longitud de onda de  $0.85 \mu\text{m}$  y  $1 \text{ dB/Km}$  para una longitud de onda de  $1.3 \mu\text{m}$ , con un ancho de banda de  $800 \text{ MHz-Km}$ .

Otro tipo de fibra en desarrollo es la fibra monomodal de índice escalonado con un núcleo de  $4$  a  $12 \mu\text{m}$  de diámetro y un revestimiento de  $125 \mu\text{m}$ . Con una atenuación de  $1 \text{ dB/Km}$  para una longitud de emisión de  $1.3 \mu\text{m}$ . Esta fibra casi no presen-

ta dispersión de modo y representa el máximo avance en ancho de banda. Su aplicación se orienta a enlaces de altas velocidades de transmisión y para largas distancias.

El mercado de fibras ópticas en la transmisión de datos está en el umbral, pero se espera que para finales de la década de 1980 la mayoría de los enlaces entre computadoras se lleven a cabo mediante cables ópticos.

En su mayoría los enlaces entre computadoras son menores - de 3 Km, por lo tanto no es necesario el uso de repetidores - con lo cual los costos se reducen considerablemente.

Actualmente se realizan experimentos con óptica integrada, la cual incluye técnicas para procesar señales luminosas dentro de películas delgadas, el equivalente óptico de los circuitos de microelectrónica integrada. Tales circuitos ópticos pueden eliminar algún día, la necesidad de convertir los pulsos luminosos a señales eléctricas y viceversa en amplificadores a lo largo de la trayectoria de transmisión.

En suma, trabajos teóricos y experimentales están procediendo sobre la posibilidad de interrumpir pulsos luminosos - directamente, simplificando la necesidad de convertir las señales luminosas a su equivalente eléctrico.

La meta es desarrollar interruptores ópticos, que reemplacen a los actuales dispositivos electromecánicos y electróni-

cos, haciendo posible la conexión de un mayor número de llama  
das telefónicas y a más altas velocidades.

## CONCLUSIONES.

Las fibras ópticas son un nuevo medio para transmitir información mediante el paso de haces luminosos a través de un filamento transparente de vidrio o de resina acrílica.

Son de dimensiones muy reducidas, su diámetro es menor que el de un cabello humano, y a la vez muy ligeras, lo que permite tener cables de pequeñas dimensiones con una gran capacidad de canales, baja atenuación y son completamente inmunes a las inducciones electromagnéticas externas.

Los sistemas de comunicación por fibras ópticas ofrecen grandes ventajas debido a su gran ligereza, alta capacidad de transmisión e inmunidad a la interferencia electromagnética, lo cual permite operar bajo condiciones en las que los cables metálicos presentan problemas de ruido y saturación de los ductos disponibles para las líneas, es posible, además, ahorrar gran cantidad de peso con la fibra óptica en comparación con los sistemas de cable coaxial y cables multipar. Estos ahorros se manifiestan principalmente en los costos de transporte y almacenaje cuando se manejan grandes volúmenes.

Desde el punto de vista comercial, actualmente se tiene en el mercado una gama amplia de fibras ópticas, que en general se pueden clasificar como:

- a) Fibra óptica de índice escalonado y un núcleo de diámetro grande (diám. del núcleo -  $100\ \mu\text{m}$ , diám. del revest. -  $140\ \mu\text{m}$ ) se emplea para transmisión de datos en distancias medias y para TV a cortas distancias.
- b) Fibra óptica multimodal de índice gradual (diám. del núcleo -  $50\ \mu\text{m}$ , diám. del revest. -  $125\ \mu\text{m}$ ), con anchos de banda comprendidos entre 100 y 200 MHz.Km, optimizadas en las longitudes de onda de 0.85 y  $1.3\ \mu\text{m}$ . Su aplicación principal es en telecomunicaciones.
- c) Fibra óptica multimodal de baja pérdida de índice escalonado y núcleo muy grande ( $> 200\ \mu\text{m}$ ), para usos militares y especiales.
- d) Fibra óptica de plástico para transmisión en el espectro visible con altas pérdidas y bajo ancho de banda, en general para uso en muy cortas distancias, principalmente en medicina.
- e) Fibra óptica monomodal de índice escalonado (diám. del núcleo 4 a  $12\ \mu\text{m}$ , diám. del revest.  $125\ \mu\text{m}$ ), presenta un alto ancho de banda y mínima atenuación.

El mercado de cables ópticos está muy diversificado por el gran número de aplicaciones disponibles, aunque se puede hablar de tres aplicaciones principales:

Un mercado orientado a satisfacer las demandas de enlaces entre computadoras o terminales de video a corta distancia, -

esta aplicación ha tenido una gran aceptación, sobre todo en medios donde las necesidades son de protección de la calidad de la transmisión, más que de alta velocidad y capacidad.

Un segundo mercado se ha enfocado al sector de telefonía, donde precisamente la participación de estas empresas ha sido preponderante para el desarrollo de la mayoría de los actuales tipos de cables ópticos. En telefonía se requieren sistemas que manejen grandes capacidades de información y altas velocidades de transmisión.

El tercer mercado disponible es de tipo potencial y está orientado para enlaces experimentales de altas velocidades de transmisión (cientos de Mb/s), y para censar diferentes fenómenos, con alta resolución y rápida respuesta.

La tendencia del mercado de cables ópticos es de un abatimiento en los costos de producción tanto de la fibra óptica como del cable mismo.

Conforme la atenuación y dispersión de la fibra continúen disminuyendo, la separación entre repetidores será cada vez mayor, con lo que virtualmente se eliminarán los repetidores intermedios, excepto para enlaces muy largos, reduciendo con ello los costos y aumentando su aplicabilidad para grandes distancias.

En cuanto a las tendencias y economía de los sistemas de -

fibras ópticas el panorama se muestra muy ambicioso, el precio de los componentes de las fibras ópticas está en función directa de los volúmenes de producción, para la siguiente década se espera que los costos decaigan y ésto acelerará la penetración de las fibras ópticas en mayores y nuevas aplicaciones.

Los dispositivos optoelectrónicos se diferencian de los sistemas radioeléctricos y electrónicos clásicos en una mayor rapidez de acción, mayor seguridad, dimensiones considerablemente menores, menor consumo de energía, una gama útil de frecuencias más amplia, un bajo nivel de ruido (evitándose interferencias) y otras ventajas.

Los sistemas de reproducción de imágenes (ópticas, fotográficas, de televisión y otras), desempeñan un papel cada vez más importante en la vida del hombre moderno, en las investigaciones científicas y en la producción, y, el advenimiento de los componentes optoelectrónicos, elementos que a diferencia de los transistores que sólo manejan señales eléctricas, realizan una conversión electroóptica o a la inversa (como los visualizadores de cristal líquido o los diodos electroluminiscentes de material semiconductor), representa un acontecimiento en la electrónica.

La transmisión de información por medio de la modulación -

de un rayo de luz a través de una fibra óptica es un ejemplo de una próxima generación, dentro de los circuitos y de las comunicaciones, así, la transmisión de imágenes de persona a persona depende estrechamente del desarrollo de los láseres - semiconductores y de las fibras ópticas.

Indudablemente, las posibilidades de la fibroóptica todavía están muy lejos de agotarse y es difícil imaginarnos qué otros dispositivos originales y de gran efectividad podrán realizarse con su ayuda.

Un futuro desarrollo en la construcción de aparatos médicos, cósmicos, óptico-mecánicos y electrónico-ópticos es inconcebible sin la utilización de los elementos de la óptica de fibras.

## BIBLIOGRAFIA

- Application Note 1000.  
Digital data transmission with the HP fiber optic system.  
Hewlett Packard.
  
- Curso sobre telecomunicaciones vía fibras ópticas; teoría y aplicaciones.  
UNAM, Facultad de Ingeniería.  
División de Educación Continua, Abril de 1983.
  
- Ericsson Review.  
Artículos:  
  
Actividades con fibras ópticas en el consorcio Ericsson.  
Johansson U.  
Vol. 57, No. 3, 1980, Pag. 74 - 79.  
  
Cables con fibras ópticas.  
Endersz G.  
Vol. 3, No. 57, 1980, Pag. 86 - 91.  
  
Empalme de cable con fibras ópticas.  
Bottcher U.  
Vol. 57, No. 3, 1980, Pag. 92 - 96.  
  
Fibras ópticas.  
Lindborg U.  
Vol. 57, No. 3, 1980, Pag. 80 - 85.  
  
Sistema fibroóptico de línea de 34 Mbit/s, ZAM 34-1.  
Giertz H., Vucins V.  
Vol. 57, No. 3, 1980, Pag. 104 - 108.
  
- Fiber Optics and Communications.  
Papers presented at the first fiber optics and communications. Exposition in the US Chicago. Sept. 6 - 8, 1978.  
Artículos:  
  
Acces coupler for fiber optics.  
L. Coyne. Pag. 136 - 140.

Fiber optics an emerging industry.  
R. Allio, A. Little. Pag. 14 - 16.

Fiber optic network for an integrated public service communication system.  
L. Richardson, K. Alexander. Pag. 35 - 38.

The near future of fiber optics wired cities and towns.  
F. Elion. Pag. 224 - 226.

- Fibroóptica.  
D. K. Gattarov.  
Ed. MIR Moscú, 1977.

- Información Científica y Tecnológica.  
Nuevos enlaces a base de fibras ópticas.  
No. 40, pag. 18 - 19, 1 de marzo de 1981.

- International Wire and Cable Symposium Proceedings 1981.  
Sponsored by: US Army Communications Electronics Command (CECOM). Fort Monmouth, New Jersey.  
November 17 - 19, 1981.  
Artículos:

A.L.P.D. (Axial Lateral Plasma Deposition); a new process - for the industrial production of low loss step-index optical fibers.  
Didier Boucher Quartz and Silice, France. Pag. 70 - 72.

A new realization of automatic train control (ATC) using optical cable.  
T. Larsson, U. Böttcher and G. Endersz. Pag. 371 - 376.

Ball lens connector system for optical fibers and cables.  
A. Nicia, D. Rittich. Pag. 341 - 350.

High density optical fiber cables for the local network.  
H. Haag, P. Rautenberg, F. Zanzow. Pag. 251 - 268.

Newly developed optical fiber / power composite umbilical cable for deep - sea unmanned work vehicle.  
S. Ohtani, T. Yasuri, M. Sasagawa, T. Ikemiya, Y. Saito.  
Pag. 114 - 125.

Some excellent properties of new optical cables with FRP optical fibers.

K. Fuse, H. Umezu, A. Otake, Y. Ishida. Pag. 147 - 159.

Ultra low loss cables using the cylindrical V - grooved structure.

M. de Vecchis, J. Hulin, J. Staath. Pag. 228 - 234.

- Mundo Científico.

Los láseres de semiconductores.

J. P. Koblanck.

No. 10, 1981, Pag. 38 - 46.

- Scientific American.

Artículos:

Communication by optical fiber.

J. S. Cook.

Vol. 229, No. 5, Pag. 28 - 35, November 1973.

Fiber Optics.

N. S. Kapany.

Vol. 203, No. 5, Pag. 72 - 81, November 1960.

Guided wave optics.

A. Yariv.

Vol. 240, No. 1, Pag. 54 - 62, January 1979.

Light wave communications.

W. S. Boyle.

Vol. 237, No. 2, Pag. 40 - 48, August 1977.

- Sovietic Journal Optical Technology.

Artículos:

An interference method of checking the diameter of a thin - optical fiber by means of laser radiation.

V. Gordeichik, T. Morozova, V. Osadchuk.

Vol. 44, No. 4, April 1977, Pag. 245 - 246.

Antireflection coating of fiber optic elements.

T. Kul'kova, L. Vasin.

Vol. 42, No. 6, June 1975, Pag. 379 - 340.

Effective aperture of optical fibers.

A. Gevchikov.

Vol. 42, No. 8, August 1975, Pag. 434 - 435.

Optical instruments for medicine and biology.

M. Miroshnikov.

Vol. 46, No. 1, January 1979, Pag. 1 - 4.

Use of fiber light-guides in viewing instruments.

E. Goncharenko, L. Osipova. Pag. 610 - 612.

- Tecnología de la fibra óptica.

Sistema óptico de transmisión de video.

B. Rhomberg.

Standard telephon und radio A. G. Zurich, Suiza.

- Física. Parte II.

D. Halliday, R. Resnick.

Compañía Editorial Continental, S. A., México.

- Optica.

E. Hecht, A. Zajac.

Fondo Educativo Interamericano, S. A.