

16  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**APLICACION DE CABLES DE FIBRA OPTICA  
A LOS SISTEMAS DE PROTECCION  
DE EQUIPO ELECTRICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

JOSE HUMBERTO AVILA ROUGON  
LEON OSCAR PALACIOS CONTRERAS  
MARIA ANGELICA GAMBOA LOPEZ

México, D. F.

1992

**TESIS CON  
VALIA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## INTRODUCCION

### I. GENERALIDADES EN PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia es el conjunto de equipos, aparatos y máquinas que tienen como finalidad, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. El servicio proporcionado por la compañía eléctrica, debe cumplir con ciertas características de calidad como son: Disponibilidad de energía eléctrica, regulación de voltaje, control de la frecuencia, bajo contenido de armónicas, continuidad en el suministro, etc. - Para mantener un servicio eficiente y dentro de las características anteriores, se ha recurrido a diferentes medidas como lo son un adecuado diseño, dispositivos que reduzcan posibles fallas, topología del sistema que permita medios alternos de suministro de energía, protección por relevadores, etc. - Este último aspecto es de gran importancia, pues existen diversos factores fortuitos que por su naturaleza son imposibles de predecir o evitar, los cuales pueden llegar a producir una falla, es aquí donde el equipo de protección juega un papel importante al tratar de reducir los efectos causados por ésta "La función de la protección de relevadores, es originar el retiro rápido del servicio de cualquier elemento de un sistema de potencia, cuando este sufre un cortocircuito (falla) o cuando empieza a funcionar en cualquier forma anormal que pueda originar daño o interferencia con el funcionamiento eficaz del resto del sistema".

Para cumplir con su finalidad, los relevadores de protección actúan sobre interruptores, cuya función es la desconexión del elemento defectuoso, -

los relevadores reciben la información necesaria para su funcionamiento -- de transformadores de potencial (TP) y de transformadores de corriente -- (TC), los cuáles aislan de la alta tensión del circuito de potencia, a los instrumentos de medición y de protección, además de proporcionar una señal con magnitudes suficientemente pequeñas para que los equipos sean poco -- costosos y de reducidas dimensiones.

Independientemente de las características de los transformadores de -- potencial y corriente, de los interruptores, y de los relevadores de -- protección, estos deben cumplir con los siguientes requisitos: ----  
" Selectividad " " Sensibilidad " y " Velocidad " . " Cual-  
quier equipo de protección debe ser lo suficientemente sensible para que -  
funcione en forma segura cuando sea necesario... Debe ser capaz de selec-  
cionar entre aquellas condiciones en las que se requiere un funcionamien-  
to rápido y aquellas en las que se requiere funcionamiento de acción retar-  
dada. Y debe funcionar a la velocidad requerida". Además de lo antes -  
mencionado es importante señalar una característica propia de cada equipo,  
la Confiabilidad, que puede expresarse como "La probabilidad de falla" --  
del mismo, como se observa es un término cualitativo, en el que entre otros  
aspectos debe considerarse la calidad de la mano de obra, el diseño y manu-  
factura de los relevadores, el mantenimiento a que se someten, etc.

#### ¿ QUE ES LA PROTECCION POR RELEVADORES ?

Los relevadores son parte muy importante dentro de un sistema eléctri-  
co de potencia y esto lo podemos notar si hacemos un pequeño análisis don-

de se presenten como base tres aspectos importantes.

- a) Funcionamiento normal
- b) Previsión de una falla eléctrica
- c) Reducción de los efectos de la falla eléctrica

El primero de los casos "FUNCIONAMIENTO NORMAL" supone que no hay fallas del equipo, errores del personal y factores aleatorios, sin embargo - hay que hacer notar que las previsiones para un funcionamiento normal comprenden un costo mayor para el equipo y el funcionamiento, pero un sistema diseñado de acuerdo con éste sólo aspecto no podría satisfacer los requisitos que se presentan ya que las fallas del equipo eléctrico originarían salidas intolerables. Es por esto que debe haber previsiones adicionales - para disminuir el daño al equipo y las interrupciones del servicio cuando ocurren las fallas.

Dos recursos que se manejan son:

1. Incorporar características de diseño con el fin de impedir las fallas.
2. Incluir previsiones para reducir los efectos de la falla cuando ésta ocurre, normalmente se emplean ambos recursos en mayor o menor grado. Pero es en vano tratar de impedir todas las fallas esto no se justifica económicamente, es mucho más provechoso, dejar que ocurran algunas de ellas y prever para reducir sus efectos.

Con relación al recurso de "impedir o prevenir fallas eléctricas" se citan algunas características de diseño y funcionamiento como son:

- a.- Provisión del aislamiento adecuado.

- b.- Coordinación de la resistencia de aislamiento con las capacidades de los pararrayos.
- c.- Uso de hilos de guarda y baja resistencia de tierra de las torres.
- d.- Resistencia mecánica de diseño para reducir la elongación y para disminuir la probabilidad de fallas originadas por animales, pájaros, insectos, polvo, granizo, etc.
- e.- Funcionamiento y prácticas de mantenimiento apropiados.

Con relación al recurso de reducir los "efectos de la falla" también se cita algunas características de diseño y funcionamiento.

- A. Características que reducen los efectos inmediatos de una falla eléctrica:
  - 1. Diseño para limitar la magnitud de la corriente de corto circuito.
    - a) Evitando concentraciones muy grandes de capacidad de generación.
    - b) Utilizando impedancia limitadora de corriente.
  - 2. Diseño para soportar los esfuerzos mecánicos y los calentamientos debidos a corrientes de corto circuito.
  - 3. Dispositivos de baja tensión con acción retardada en interruptores, para evitar la caída de las cargas durante disminuciones de tensión momentáneas.
  - 4. Neutralizadores de fallas a tierra.
- B. Características para conexión rápida de los elementos defectuosos.
  - 1. Protección por relevadores.

2. Interruptores con suficiente capacidad interruptiva
  3. Fusibles
- C. Características que reducen la pérdida del elemento defectuoso
1. Circuitos alternados
  2. Capacidad de reserva de generadores y transformadores
  3. Recierre automático
- D. Características que funcionan en todo el período desde la iniciación de la falla hasta que se elimina ésta, para mantener la tensión y la estabilidad.
1. Regulación automática de la tensión
  2. Características de estabilidad de los generadores
- E. Medios para observar la eficiencia de las características anteriores.
1. Oscilógrafos automáticos
  2. Observación humana eficiente y registro de datos
- F. Inspecciones frecuentes a medida que cambia el sistema o adiciones que se hagan para estar seguro de que las características anteriores son aún adecuadas.

Es por esto que la protección por relevadores es una de las diversas características del diseño de un sistema relacionado con la disminución del daño al equipo y con las interrupciones al servicio cuando ocurren las fallas eléctricas. De esta manera los relevadores protegen y junto con otro equipo ayudan a disminuir el daño y a mejorar el servicio.

## REDES DE TIERRA

Dentro de las medidas de diseño que permiten la protección contra sobretensiones de equipo y personal de una subestación la "red de tierra", destaca por su importancia, pues se requiere para la conexión de los neutros de los aparatos, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas otras partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

Las funciones que debe cubrir la red de tierra son:

Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para las corrientes a tierra, ya sea debidas a fallas de aislamiento ó a la operación de un pararrayo.

Evitar durante la circulación de estas corrientes de tierra, la elevación de diferencias de potencial entre puntos de la subestación, que puedan ser peligrosas para el personal.

Facilitar mediante sistemas de relevadores la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.

Se considera que existen 3 tipos de redes de tierra.

S. Radial.

Consiste en uno ó varios electrodos a los cuáles se conectan a las derivaciones de cada aparato. Este sistema tiene el problema de propiciar elevados gradientes de potencial.



#### S. de Anillo.

Se obtiene, colocando en forma de anillo un cable de cobre en torno a la superficie ocupada por la subestación y conectando derivaciones a cada aparato usando cables más delgados.

#### S. de Red.

Es el sistema más usado debido a su gran eficiencia, consiste en una malla formada por cable de cobre y conectado a través de electrodos de varillas de "copperweld" a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad.

El método de cálculo consiste en encontrar mediante operaciones interactivas las dimensiones de la red que hacen que las tensiones y corrientes sean menores que las tolerables por el cuerpo humano, tomando en cuenta factores como: resistividad del suelo, máximas corrientes de falla, área ocupada por la subestación, tiempo de duración de la falla, efecto de los hilos de guarda, etc.

#### I.1 HILO PILOTO.

El término "PILOTO" significa que entre los extremos de la línea de transmisión hay un canal de interconexión de alguna clase en el que puede transmitirse la información.

Tres tipos diferentes de un canal semejante están ya en uso y se les conoce por: "HILO PILOTO", "Piloto por corriente portadora" y "Piloto por micro-ondas".

Un "HILO PILOTO" consiste generalmente de un circuito de dos hilos del tipo de línea telefónica, ya sea hilo abierto ó cable, con frecuencia dichos circuitos pertenecen a la compañía local de teléfonos.

Un "piloto por corriente" portadora para propósitos de protección por relevadores es uno en el que se transmiten corrientes de baja tensión y alta frecuencia ( 30khz a 200 khz) a lo largo de un conductor de una línea de potencia hacia un receptor en el otro extremo; la tierra y el hilo de guarda funcionan generalmente como el conductor de retorno.

Un piloto por onda centimétrica ó micro-onda es un sistema de radio de muy elevada frecuencia que funciona arriba de 900 Mega Hertz.

Un hilo piloto es económico generalmente para distancias hasta 5 ó 10 millas, además de que un piloto por corriente portadora viene a ser de ordinario más económico, los pilotos por micro-onda se utilizan cuando el número de servicios que requieren canales piloto exceden las capacidades técnicas ó económicas de la corriente portadora.

No hay que olvidar que la protección por piloto sólo proporciona protección primaria; la protección de respaldo debe proporcionarse por protección suplementaria.

La razón principal por la que no se utilizan relevadores diferentes de corriente para proteger las líneas de transmisión es que tendrían que ser demasiadas interconexiones entre los transformadores de corriente (TC) para hacer económicamente factible este tipo de protección en las distancias comunes incluidas en la protección de líneas de transmisión.

Otras razones para no utilizar la protección diferencial de corriente son:

- 1) La probabilidad de funcionamiento inadecuado debido a las imprecisiones de los TC bajo las cargas pesadas que se incluirían.
- 2) El efecto de la corriente de carga entre los hilos piloto.
- 3) Las grandes caídas de tensión en los hilos piloto que requieren mejor aislamiento.
- 4) Las corrientes y tensiones piloto serían excesivas para los circuitos piloto pertenecientes a una compañía telefónica.

#### PILOTOS DE DISPARO Y DE BLOQUEO

##### PROTECCION

Como se estableció anteriormente el propósito de una piloto es transmitir cierta información de un extremo de una sección de línea al otro, para hacer posible el disparo selectivo. De tal forma que si el equipo de protección en un extremo de la línea debe recibir una cierta señal o muestra de corriente del otro extremo, para impedir el disparo en un extremo - se dice que la protección piloto va a ser un "PILOTO DE BLOQUEO". Sin embargo si un extremo no puede disparar sin la recepción de una cierta señal o muestra de corriente del otro extremo, se dice que la protección piloto va a ser un "PILOTO DE DISPARO".

## SUPERVISION DE CIRCUITOS DE HILOS PILOTOS

Hay dos tipos de equipos:

a) EQUIPO MANUAL: Para hacer pruebas periódicas del circuito piloto, el cuál proporciona medios para medir las magnitudes del hilo piloto y la contribución de los extremos.

b) EQUIPO AUTOMATICO: Para supervisar continuamente el circuito piloto, el cuál superpone corriente directa en dicho circuito; el disturbio origina aumento o disminución en la corriente supervisora de C.D., la que se detecta por relevadores auxiliares. El equipo automático puede arreglarse no sólo para hacer sonar una alarma cuando los hilos piloto están en circuito abierto o en corto circuito, sino también para abrir el circuito de disparo o evitar el disparo no deseado.

## DISPARO REMOTO EN LOS HILOS PILOTO

Si se deseara disparar el interruptor remoto bajo cualquier circunstancia, esto puede hacerse superponiendo corriente directa en el circuito piloto. Si se utiliza equipo supervisor automático, la magnitud de la tensión de C.D., impuesta momentáneamente en el circuito de disparo remoto es más elevada que la tensión continua utilizada para propósitos supervisores.

Una desventaja de este método de disparo remoto es la posibilidad de disparo no deseado, si, durante la prueba, se aplica inadvertidamente una tensión de prueba de C.D., a los hilos pilotos. Para evitar esto, han si

## LOS HILOS PILOTO Y SU PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES

El funcionamiento satisfactorio del equipo de protección por hilo piloto depende primeramente de la confiabilidad del circuito del hilo piloto. Los registros de la protección por relevadores son en general más exigentes que los de cualquier otro servicio que utiliza circuito piloto. El circuito piloto ideal es uno que es propiedad del usuario y está construído para que no esté expuesto a las descargas, a la inducción mutua con otro hilo piloto ó a otros circuitos de potencia, a diferencias, del potencial de tierra de la estación, o contacto directo con cualquier conductor de potencia. Sin embargo, puede obtenerse el funcionamiento satisfactorio donde estos ideales no están completamente realizados, si se utilizan medidas contrarias adecuadas.

Si no se utiliza el equipo supervisor ó disparo remoto, es decir; si no hay conexiones del equipo terminal a los hilos piloto en el lado del transformador de aislamiento del hilo piloto, éste es sólo una cuestión de si el transformador de aislamiento y los hilos del piloto pueden soportar la tensión a tierra que éstos obtendrán en la inducción mutua y de la diferencia de potenciales de tierra en la extensión, entonces los transformadores de aislamiento pueden contar tan sólo con tener aislamiento suficiente y los hilos piloto necesitarán solamente examinarse críticamente.

Pero si se incluye equipo supervisor, o si los hilos piloto pueden ponerse a tierra de otra manera en un extremo y no tienen aislamiento sufi-

ciente, pueden requerirse medios adicionales que incluyen transformadores neutralizadores para proteger al personal o al equipo.

Los hilos piloto expuestos a las sobretensiones de descargas deben protegerse con pararrayos. Igualmente, deben protegerse los hilos piloto expuestos al contacto con un circuito de potencia.

## 1.2 PROTECCION DIRECCIONAL

Los relevadores direccionales son accionados por dos magnitudes eléctricas independientes, por lo que el ángulo de fase entre ellas puede cambiar. Básicamente un relevador direccional de AC, puede reconocer ciertas diferencias en el ángulo de fase entre dos magnitudes proporcionadas en las entradas del relevador. La magnitud que produce uno de los flujos es conocida como magnitud polarizante y es la referencia contra la que se compara el ángulo de la otra magnitud. En consecuencia el ángulo de fase de la magnitud polarizante debe permanecer fijo, cuando la otra magnitud, llamada de operación, sufre cambios. La magnitud polarizante puede ser una corriente (I pol) o un voltaje (V pol), mientras que la magnitud de operación generalmente es una corriente (I op).

En el caso del relevador corriente-corriente, el valor del par es:

$$T = K_1 I_{pol} I_{op} \cos(\theta - \delta) - K_2 \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

T = Valor del par

- $K_1$  = Constante
- $K$  = Restricción mecánica
- $I_{pol}$  = Corriente de polarización
- $I_{op}$  = Corriente de operación
- $\theta$  = Angulo de fase
- $\delta$  = Angulo de par máximo

Un relevador direccional corriente-tensión, recibe una magnitud de influencia de un transformador de tensión. La ecuación que define su comportamiento es:

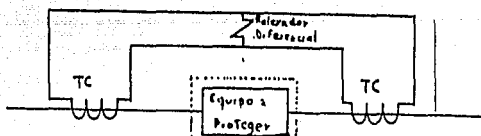
$$T = K_1 V_{pol} I_{op} \cos(\theta - \delta) - K_2 \dots \dots \dots (2)$$

Como se observa de las ecuaciones 1 y 2, el par máximo ocurre cuando - el ángulo de fase es de 90 grados, sin embargo en general se desea que el par máximo ocurra en algún valor diferente de 90 grados, para lo cual una de la bobinas actuantes del relevador debe ponerse en derivación con una - resistencia ó capacitor. Con este cambio, el par máximo ocurrirá a un valor diferente de 90 grados entre las fuentes, pero seguirá ocurriendo a 90 grados con respecto a las corrientes en las bobinas de operación.

### 1.3 PROTECCION DIFERENCIAL

Un relevador diferencial es el "que funciona cuando el vector diferencia de 2 ó más magnitudes eléctricas similares excede una cantidad determinada". "Estas pueden ser, la magnitud de la corriente, la dirección de la corriente, la dirección de la potencia, la fase relativa de las corrientes en los extremos de la zona o aparato protegido, etc." Este tipo de relevadores tienen gran aplicación y la forma de operar depende del equipo a proteger, pudiendo ser estos: el embobinado de un generador, unas barras colectoras (buses), transformadores, motores ó líneas.

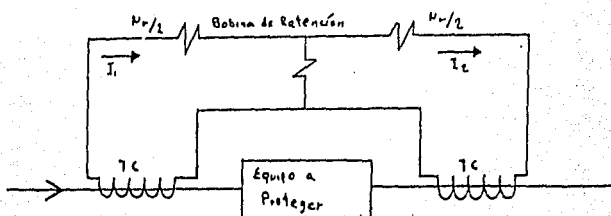
El relevador diferencial de corriente que es un arreglo muy simple se muestra en la figura siguiente:



La parte punteada representa el elemento protegido, los secundarios de los transformadores de corriente se interconectan y se conectan a la bobina de operación del relevador. Si la falla es externa al elemento protegido y suponiendo que los TC tienen igual relación de transformación, las corrientes no circulan por el relevador, pero si la falla es entre los TC, la suma de las corrientes fluye por el relevador.



Una forma más común es el relevador diferencial de tanto por ciento, esta conexión se obtiene haciendo circular la corriente por una bobina auxiliar que ejerce una fuerza restrictiva. La corriente diferencial requerida para accionar el relevador es variable debido al efecto de la bobina de retención. En la siguiente figura se muestran los elementos de este arreglo.



La fuerza de restricción:  $K (I_1 + I_2) \frac{N_r}{2} + S$

La fuerza de operación es:  $K (I_1 - I_2) N_o$

Donde:

$N_o$  Número de vueltas de la bobina de operación.

$N_r$  Número de vueltas de la bobina de restricción.

$K$  Constante

$S$  Restricción mecánica (resorte).

En el punto de equilibrio y despreciando el efecto del resorte, se tiene:

$$K (I_1 - I_2) N_o = K (I_1 + I_2) \frac{N_r}{2}$$

de donde:

$$\frac{I_1 - I_2}{(I_1 + I_2) \left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{N_o}{N_r}$$

La relación entre la corriente diferencial y la corriente promedio de retención es un porcentaje fijo, lo que da el nombre a este arreglo.

Este tipo de relevador reduce el funcionamiento inadecuado, ya que su característica de puesta en marcha crece a medida que aumenta la corriente, y minimiza el error producido por la diferencia entre transformadores supuestamente idénticos, pero que tienen ligeras variaciones en sus propiedades magnéticas.

#### 1.4. PROTECCION DE SOBRECARGA

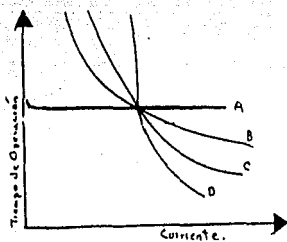
Los relevadores de sobrecarga son los que funcionan cuando el nivel de la corriente excede un valor prefijo como carga máxima. Generalmente, se clasifican en instantáneos, de tiempo definido y de tiempo inverso. El relevador de sobrecorriente instantáneo, es aquel en el que no existe retraso intencional. Este tipo de relevadores tiene la ventaja especial de reducir el tiempo de operación a un mínimo para fallas cercanas a la fuente cuando la corriente es máxima.

En el relevador de tiempo definido, el tiempo de operación permanece prácticamente constante en su intervalo de trabajo.

Los relevadores cuya característica de tiempo es tal que, el tiempo de operación es menor a medida que aumenta el nivel de la corriente se conocen como relevadores de tiempo inverso y a medida en que este efecto se acentúa se dice que es "más inverso", es decir cuanto mayor es la pendiente de la característica de tiempo, más inverso es el relevador. De esta forma puede encontrarse relevadores llamados de tiempo inverso, de tiempo muy inverso y de tiempo extremadamente inverso.

Estos relevadores son en general de inducción de tipo copa ó disco y funcionan con una sola variable (corriente). El tiempo de operación puede elegirse mediante la selección de una característica de tiempo entre un gran número de curvas, graduando el viaje del motor, desde su posición de reposición a la de operación. Esto se lleva a cabo ajustando el tope de reposición.

A continuación se presentarán algunas características de tiempo de los relevadores de sobrecorriente de tiempo variable.



Curvas de algunos tipos de relevadores de sobrecorriente

- A) Tiempo definido
- B) Tiempo inverso
- C) Tiempo muy inverso
- D) Tiempo extremadamente inverso

## I.1 HISTORIA DE LAS COMUNICACIONES OPTICAS

?	GRECIA	Observación de la transmisión de la luz en un trozo de vidrio.
?	VENECIA	Flores decorativas hechas en fibra de vidrio.
1609	GALILEO (ITALIA)	Lente de Galileo.
1626	SNELL (HOLANDA)	Ley de Snell.
1668	NEWTON	Telescopio de reflexión.
1870	TYNDALL	Guía de la luz con un hilo de agua fino.
1873	MAXWELL (GB)	Estudios teóricos sobre las ondas <u>electro</u> magnéticas.
1888	HERTZ (ALEMANIA)	Confirmación de la existencia de ondas electromagnéticas y de su carácter común con la luz.
1897	RAYLEIGH (GB)	Análisis de una guía de onda.
1930	LAMB (ALEMANIA)	Experiencias con una fibra de sílice.
1951	HEEL, HOPKINGS Y KAPANY (GB)	Transmisión de una imagen con un conjunto de fibras ópticas.

1958-59	KAPANY (GB)	Fibras ópticas con revestimiento.
1960	MAIMAN (USA)	Funcionamiento del laser de rubi.
1960	JAVAN (USA)	Funcionamiento del laser de He-Ne
1961	KAPANY Y SNITSER (GB)	Análisis de los modos de propagación en una fibra óptica.
1962	USA	Funcionamiento del laser de semiconduc-- tor.
1966	KAO Y HOCKHAM (GB)	Sugestiones de empleo de fibra óptica -- para transmisión a gran distancia.
1966	UCHIDA, KAWAKAMI Y NISHI ZAWA	Guía de onda óptica con índice gradual.
1970	KAPRON Y KECK (USA)	Fibra con atenuación de 10 dB/Km.
1972	GAMBLING (GB)	Ancho de banda del orden gigahertz en i Km.
1975	PAYNE Y GAMBLING (GB)	Estudio teórico que provee una disper-- sión de material, nula a 1.3 um.
1976	HORIGUCHI Y OSANI (JAPON)	Fibra con atenuación de 0.47 dB/Km a -- 1.3 um.

1978	GAMBLING Y MAT SUMURA (GB)	Dispersión de primer orden, nula en fi- bras unimodales.
1979	MIYASHITA (JAPON)	Fibra con atenuación de 0.2 dB/Km a 1.5- um.
1979	SHIMADO (JAPON)	Transmisión por fibra en 100 Km.
1981	BEALES	Dispersión inferior a 4 ps/nm/km en una fibra unimodal.

## II. FIBRA OPTICA.

### II.2 PANORAMA GENERAL.

Desde el inicio de los tiempos ha sido indispensable la comunicación entre los seres vivos, tanto para la subsistencia individual, como de la propia especie. Hoy día las telecomunicaciones engloban a todos aquellos sistemas, equipos y métodos que facilitan la transmisión de información - generalmente por métodos electrónicos.

La información adquiere la forma de voz, documentos, gráficas, códigos, imágenes, datos. Todo ello es susceptible de ser procesado electrónicamente y así hacerlo fluir a través de los medios de comunicación que nos rodean. Nos encontramos inmersos entre rádios, televisores, teléfonos cables, microondas, satélites e incluso fibras ópticas.

Cada uno de estos medios alternos ha encontrado un lugar y una aplicación particular en las telecomunicaciones. De entre todos ellos destacan las fibras ópticas (FO) por sus muy singulares propiedades. Las FO son pequeñas, ligeras, compactas, con bajas pérdidas, gran capacidad de transmisión de información y prácticamente libres de interferencias e intercepciones. Son la solución a la creciente demanda de canales de comunicación terrestre, tanto para pequeñas, como para grandes distancias.

### II.2 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO, PRINCIPIOS OPTICA Y PROPAGACION.

#### II.2.1. ESPECTRO ELECTROMAGNETICO:

El conocimiento de este espectro se inició cuando el Físico Alemán -



Heinrich Hertz descubrió las ondas hertzianas hoy simplemente ondas de radio u ondas electromagnéticas. Ellas se generan en un conductor (antena) debido a la oscilación de una corriente eléctrica en el mismo. Es decir, se deben a las variaciones, temporales del campo eléctrico y del campo magnético, asociados con una corriente eléctrica.

El siguiente rango de frecuencia dentro del espectro, está cubierto por el infra-rojo (IR). Esto abarca tres sub-regiones: lejano, medio y cercano. Fué el IR inicialmente explorado por los ópticos, quienes habían comenzado sus estudios en el rango visible del espectro. El visible comprende todas las ondas electromagnéticas perceptibles por el ojo humano, detectadas como rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta, en orden creciente de frecuencias.

Después del visible encontramos el ultra-violeta (UV), los rayos-X y los rayos gamma. Dentro de estos tres últimos rangos aún falta mucho por desarrollar en sistemas electrónicos comerciales. Los avances actuales son solamente de aplicaciones particulares en laboratorios o en la milicia.

Actualmente las FO han sido utilizadas en el visible para efectos ornamentales, también en aplicaciones médicas con fibroscopios, para observación, iluminación e incluso cirugía (cauterización y bisturí). En el UV las fibras tienen una mayor atenuación y por tanto menos aplicaciones.

La más amplia utilización de las FO ha sido en el IR cercano, en longitudes de ondas cercanas al visible. Los nuevos desarrollos en FO son.

con mayores longitudes onda, adentrándose más en el IR.

### II.2.2 INDICE DE REFRACCION

Las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la velocidad de la luz, "c". En el aire es casi la misma velocidad, pero en otros medios, las ondas viajan a menores velocidades, "v". Para cuantificar esta diferencia de velocidades se ha definido el índice de refracción, "n", como el cociente c/v.

### II.2.3 LEY DE SNELL

Viajando la luz (onda electromagnética) dentro de un mismo material, mantiene una velocidad y una dirección de propagación. Sin embargo, al pasar de un medio a otro, no sólo cambia la velocidad sino también la dirección de propagación. Esta propiedad de la luz fue explicada cuantitativamente por el Físico Holandés Snell, con base al diagrama anexo, la ley de refracción de la luz, se expresa como:

$$n_1 \text{ sen } (A_1) = n_2 \text{ sen } (A_2)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción y  $A_1$  y  $A_2$  los ángulos de las direcciones de propagación, medidos éstos con respecto a la normal (perpendicular) a la frontera entre los dos medios, 1 y 2.

Esta ley de refracción es válida para cualquier tipo de ondas electromagnéticas, en todo el espectro de frecuencias, en tanto los materiales involucrados sean "transparentes" a la frecuencia ó longitud de onda de in-

terés. Para otros fenómenos ondulatorios es también válida dicha ley, si se cumple además la condición de transparencia del material.

Dentro del rango visible del espectro, el ojo distingue claramente un material opaco de uno transparente. Las ondas sonoras tienen cierta intensidad en el aire, pero en el agua ó en el acero parecen ser más intensas. Es decir que el agua y los metales son transparentes al sonido. Igualmente la parafina es transparente en un rango de micro-ondas; el silicio y el germanio son transparentes en un amplio rango del infra-rojo.

#### II.2.4 REFLEXION TOTAL INTERNA

La ley de refracción es válida para un rayo de luz que vaya del medio con índice  $n_1$  al medio con índice  $n_2$  pero también es igualmente válida para el sentido opuesto. Este es el principio de reversibilidad, válido en general, para un gran número de fenómenos ondulatorios.

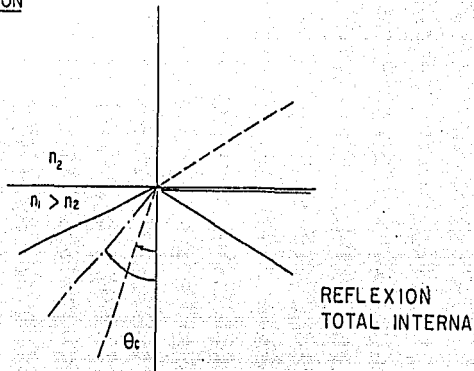
Un caso de interés particular es cuando  $n_1 > n_2$  y tenemos un rayo que va del medio 1 al medio 2. Con referencia al diagrama de refracción, vemos que al aumentar el ángulo  $A_1$  se puede llegar al caso en que  $A_2=90^\circ$ . Esto significaría que el rayo "saliente" no se propagaría ya más en el medio 2, sino a lo largo de la frontera entre los dos medios. Bajo esta circunstancia se denomina  $A_1=C$ , el ángulo crítico.

Para ángulos de incidencia mayores a ese ángulo crítico, la luz sufre una reflexión total interna. En tal situación ya no es válida la ley de Snell, sino que se requiere de una explicación más profunda, dentro de la

teoría electromagnética.

Consideremos ahora una "franja" horizontal de material  $n_1$ , limitado por material  $n_2$ , siendo  $n_1 > n_2$  (ver diagrama).

### REFRACCION



Tomemos dentro del medio  $n_1$  un rayo de luz, viajando de izquierda a derecha, con una inclinación tal que está próximo a la horizontal. Entonces dicho rayo se reflejará sucesivamente en las fronteras entre los medios y permanecerá dentro del medio 1. Ante esta situación el medio 2 puede ser finito, estando limitado a una cierta extensión más allá del medio 1 (ver diagrama anexo).

Hemos llegado así a descubrir una guía de onda, puesto que no se ha limitado la extensión del medio 1, ni tampoco la posibilidad de que éste se curva al extenderse. Esto es, hemos descrito lo que acontece dentro de una fibra óptica.

### II.3 CARACTERISTICAS GENERALES

La luz, presente desde siempre, es ahora utilizada como uno de los más eficientes métodos de comunicación a través de las fibras ópticas.

Las fibras ópticas están contruidas de manera tal que la luz viaja dentro de ellas, a través de muchos kilómetros con la mínima atenuación y sin salirse de las mismas. Por ello nos referimos a las fibras ópticas (F.O.) como guías de onda ópticas.

Las características de las F.O. están determinadas principalmente por el diámetro y perfil del índice de refracción del núcleo de la fibra. Estos parámetros determinan el número de modos posibles del recorrido de la luz por la fibra. En cada modo la luz pasa el eje de la fibra con cierto ángulo y con una cierta distancia entre pasos. Cada modo está caracterizado por estar la luz sometida a un cierto factor de atenuación y la dispersión de pulsos de un cierto tramo de fibra dependerán por tanto de la cantidad de potencia luminosa que se aplicó por cada modo desde un principio, es decir de la distribución en modos. A causa de irregularidades en la fibra hay que contar con una cierta mezcla de modos. Si éstas irregularidades están homogéneamente distribuidas a lo largo del tramo de fibra, la distribución de modos adopta después de una cierta longitud de fibra de una forma estable característica: fig. 1. Con longitudes de fibra toda-  
vía mayor es la variación de la atenuación en función de la longitud es lineal y la dispersión es un proceso más regular.

- - - - -

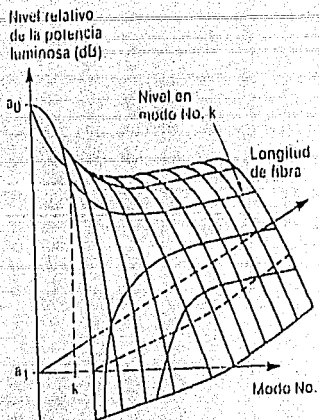


Fig. 1 Variación de la distribución de modos en función de la longitud de fibra.

Una fibra óptica está compuesta por un núcleo central que conduce la luz, un revestimiento sin el cuál se perdería el efecto de guía de onda, - sobre el conjunto núcleo/revestimiento se aplica una fina capa o envoltura protectora de plástico llamada protección primaria. fig.2.

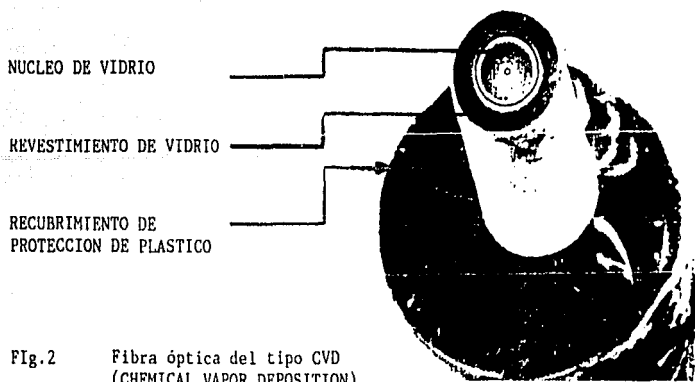


Fig.2 Fibra óptica del tipo CVD (CHEMICAL VAPOR DEPOSITION)

Núcleo y revestimiento forman una sola unidad siendo ambos de vidrio, de muy alta pureza. La luz que viaja en el núcleo se refleja en el revestimiento y regresa al núcleo para continuar viajando a través del mismo.

Las dimensiones de las fibras ópticas son de micras (milésimas de milímetro), el revestimiento ha sido prácticamente estandarizado a 125 micras de diámetro. En cambio el núcleo tiene típicamente dos diámetros: 50 micras y 9 micras. Apreciamos que estas dimensiones son comparables con las de las longitudes de onda utilizadas, ya que  $1000 \text{ NM} = 1 \text{ MICRA} \text{ (MICRA} = \text{UM)}$ . Con lo anterior se distinguen 2 tipos de fibras ópticas las multimodo (MM) y la unimodo (UM), cada una operando en diferentes longitudes de onda.

FO	DIMENSIONES (UM)	LONGITUD DE ONDA (NM)
MM	50/125	850,1300
UM	9/125	1300,1500
	N/R	

Los parámetros de mayor interés en una fibra óptica son:

PARAMETRO	CARACTERISTICAS
DIAMETRO DEL NUCLEO	DIMENSIONAL
APERTURA NUMERICA	CONO DE ACEPTACION DE LUZ
ATENUACION	LONGITUD DE COMUNICACION
ANCHO DE BANDA	CAPACIDAD DE INFORMACION

Estos 4 parámetros son aplicables tanto a las fibras ópticas multimodo como a las unimodo. En las UM hay otros 2 parámetros:

1. LONGITUD DE ONDA DE CORTE
2. DISPERSION

#### ATENUACION:

La premisa más importante para la comunicación óptica es poder disponer de un material de fibras con baja atenuación para la luz, es decir reducir la pérdida de energía.

La atenuación en una fibra depende de su absorción\* y de la difusión - de la luz\*\*. Para conseguir una baja atenuación se requiere un material de fibra extremadamente puro y libre de inhomogeneidades de cualquier clase.

\* La luz es absorbida en el vidrio, principalmente por los iones de impurezas, y se convierte en calor. Los iones OH de agua de constitución del vidrio dan una absorción con máximos a 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 onda luminosa y la composición del vidrio. Incluso porcentajes tan bajos como 10 milésimas de millón de impurezas pueden dar atenuaciones adicionales de 1dB/Km. Este contenido representa 10 mg/tonelada.

\*\* Por difusión se entiende que la luz es reflejada 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 lugar por inhomogeneidades de mayores dimensiones que la longitud de onda luminosa, por ejemplo: burbujas de aire, y por efectos de tensiones mecánicas.



## APERTURA NUMERICA

La apertura numérica, "NA", de una fibra está determinada por el ángulo máximo con que la luz se puede aplicar a una fibra y el ángulo máximo del cono de luz que se puede formar en el extremo de salida de la fibra; -  
fig. 3.

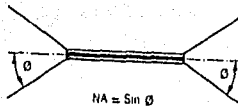


Fig. 3 Definición de apertura numérica a partir del mayor cono de rayos entrantes o salientes NA Apertura Numérica.

Es por ello que en fibras ópticas multimodales se utilizan fuentes LED, con grandes conos de emisión, como las fibras ópticas unimodo tienen menores conos de aceptación, entonces son utilizados los lasers, que son fuentes de luz muy direccionales, conos angostos con lo cual es posible acoplar mayor potencia dentro de la fibra óptica.

Una apertura numérica reduce las pérdidas de acoplamiento a la fuente luminosa y detector, pero exige una gran diferencia en composición química entre el núcleo y su revestimientos lo cual implica generalmente mayor atenuación.

## ANCHO DE BANDA

Capacidad de respuesta en frecuencia desde DC (corriente directa) - hasta el punto donde la señal de salida (del equipo ó de la F.O.) baja - 3dB con respecto al máximo.

Las fibras ópticas protegidas convenientemente en un cable, se pueden instalar en longitudes de varios kilómetros. Entonces el ancho de banda es teórico, se calcula dividiendo el ancho de banda especificado, por ejemplo: 300MZH-KM, entre longitud instalada. Con las fibras ópticas multimodo se alcanzan hasta 10 KMS., resultando en 30 MZH de ancho de banda, pero con las fibras unimodo se pueden alcanzar fácilmente 30 KMS., y recientemente se han logrado enlaces de poco más de 100KMS. con anchos de banda medios de 4 GHZ en la longitud total, esto significa una muy alta capacidad de transmisión de información. (Equivalente a más de 60.000 canales telefónicos).

#### DISPERSION

La dispersión o prolongación de pulsos decide la densidad con que los pulsos pueden emitirse en serie por una fibra óptica y por tanto la cantidad de información que puede transmitirse por unidad de tiempo. La dispersión se calcula a partir de la anchura de los pulsos de entrada y de salida, fig. 4. La anchura de banda disminuye al aumentar la dispersión.

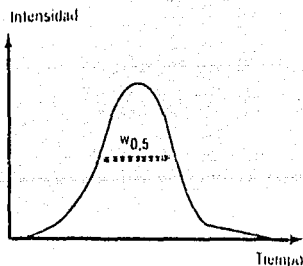


Fig. 4 Definición de la dispersión de pulsos a partir de la anchura de la respuesta de pulsos a la mitad de la altura.

La distorsión se produce por varios mecanismos dispersivos; dispersión de modo, dispersión debida al material y dispersión debida a la guía de ondas.

#### DISPERSION DE MODOS, FIBRAS MULTIMODO Y MONOMODO

En fibras corrientes, fibras multimodo, con núcleo de unos  $50 \mu\text{m}$  la luz se propaga en miles de modos diferentes. Con núcleo de índice de refracción constante estos modos se propagan con velocidades algo diferentes en sentido axial, entre otras razones porque diferentes partes de los rayos luminosos tienen que recorrer diferentes distancias. Fabricando las fibras con un perfil de índice de refracción  $n(r)$ , exactamente controlado en sentido radial, se les puede dar a los diferentes modos la misma velocidad en sentido axial reduciéndose a un mínimo la distorsión de modo. Se habla entonces de una fibra con índice gradual de refracción. A menudo se procura dar perfil parabólico de índice de refracción.

En fibras monomodo la propagación de la luz tiene lugar en solamente un modo (o más estrictamente en un par de modos) y por tanto sin distorsión de modo. Para obtener una propagación monomodo, el diámetro del núcleo debe ser menor de un cierto valor crítico determinado por la diferencia en índice de refracción y la longitud de onda empleada. El diámetro de núcleo es en la práctica  $5-10 \mu\text{m}$ . La fibra monomodo es más difícil de acoplar a la fuente de luz y más difícil de empalmar que los restantes tipos pero tiene un interés potencial para telecomunicaciones a causa de su alta capacidad de transmisión y largas distancias de transmisión.

## DISPERSION DEBIDA AL MATERIAL Y DEBIDA AL GUIAONDAS

La dispersión debida al material y la dispersión debida al guíaondas dependen de la anchura espectral de la fuente luminosa empleada y de que los rayos de luz de diferentes longitudes de onda se propagan con diferentes velocidades. Estos tipos de dispersión afectan a ambas fibras monomodo y multimodo.

## LONGITUD DE ONDA DE CORTE

Indica la frontera que separa el comportamiento multimodal del comportamiento unimodal de una fibra. Debe trabajar por arriba de ella para que la fibra se comporte como unimodal.

La definición más usada es: la longitud de corte efectiva " $\lambda_c$ " es aquella longitud de onda para la cuál la atenuación de un tramo de fibra enrollado en un tambor de 20mm excede en 0.1dB la atenuación de la misma fibra, sujeta a una curvatura no inferior a 25 mm.

## II.4 FABRICACION DE FIBRA OPTICA

Dos partes se requieren para formar una guía de ondas de luz. Por un lado el primer medio de índice de refracción  $n_1$ , por otro lado el medio de índice  $n_2$  que actuará como frontera para confinar las ondas dentro del primer medio. Para eficientar la acción de "guiado" y poder alcanzar grandes distancias, las dimensiones de la guía deben ser del mismo orden de magnitud que las de la longitud de onda de las señales a transmitir. Esto explica el porqué de las dimensiones micrométricas de las fibras ópticas.

Se conocen 2 métodos para la fabricación de fibras ópticas; el método de Doble Crisol (DC) y el CVD (Chemical Vapor Deposition).

La impresión general es que el vidrio es un material fácilmente quebradizo. Pero la verdad es que se pueden fabricar fibras de vidrio con mayor resistencia que el acero. La tensión de rotura en pruebas de tracción de fibra óptica se encuentra normalmente en un valor tan alto como 3000 MN/m<sup>2</sup> (fibras DC) y 5000 MN/m<sup>2</sup> (CVD) correspondientes a 4 y 7 %, respectivamente de dilatación elástica. Una fibra CVD de 125  $\mu$ m puede soportar un peso de 5kg sin romperse.

Una premisa para que las fibras sean altamente resistentes es que no tengan microfisuras u otros defectos en la superficie ó en la masa del vidrio.

Según el método CVD el material de vidrio se produce por medio de una reacción gaseosa mientras que según el método de Crisol Doble se recurre a procesos de fundición similares a los que se emplean para la producción convencional de objetos de vidrio.

#### METODO CVD

##### FIBRAS CVD

##### PRODUCCION DEL MATERIAL DE PARTIDA

El material de partida según el método CVD es un tubo de cuarzo, generalmente de 20 mm de diametro externo, y de 1 m de longitud. En el interior del tubo se precipita vidrio procedente de una fase de vaporización. El tubo constituirá el revestimiento de la fibra y el vidrio precipitado -

el núcleo.

El vidrio se precipita en el interior del tubo colocándolo éste en un torno y calentándolo con un quemador de hidrógeno-oxígeno que se desplaza en vaivén a lo largo del tubo. El oxígeno se hace pasar por cámaras de borbotaje que contienen productos químicos (fig. 5) los cuáles junto con el oxígeno, reaccionan químicamente en la zona calentada por el quemador y forman una delgada película de vidrio con un índice de refracción que puede ser mayor o menor que el del tubo original. Variando la composición del gas que se aplica al tubo puede irse formando un perfil de índice de refracción de tipo gradual. Para dar a la fibra un perfil de índice suficientemente gradual deben depositarse hasta 50 capas de vidrio.

Una vez finalizada la fase de deposición se aumenta la temperatura del quemador y su velocidad de vaivén se disminuye con lo que el tubo se contrae a causa de la tensión superficial y forma una barra maciza (preform) con el vidrio depositado en el centro. Esta barra, de 8-12 mm de diámetro puede después estirarse para formar la fibra.

#### ESTIRADO DE FIBRA DE VIDRIO

La barra obtenida en el torno se fija en un mandril encima de un horno de alta temperatura y se sumerge en éste con velocidad constante. El horno está calentado por resistencia con un elemento de grafito y su temperatura máxima es de unos 2400°C. Es necesaria una atmósfera de protección para que el elemento de grafito y el oxígeno del aire no formen dióxido de carbono a estas temperaturas. Como gas inerte se emplea argón. La par-

te de la barra de vidrio que se encuentra en la zona caliente del horno se reblandece y de ella se estira la barra de vidrio hasta formar una fibra - con un diámetro externo de  $125 \pm 1 \mu\text{m}$ .

El diámetro de la fibra se mide continuamente al mismo tiempo que se está estirando, sin ningún contacto mecánico, por medio de un laser. Sobre la fibra se aplica una primera protección de plástico haciéndola pasar por un depósito de goma silicónica. Esta protección primaria se endurece calentando en un horno y la fibra se embobina por fin en un tambor de 1 metro de diámetro. Una barra de material de partida da normalmente 3-4 km. de fibra acabada que se puede embobinar en uno ó más tambores.

#### METODO DOBLE CRISOL

Son dos crisoles concentrados, en el interior se funde vidrio con índice  $n_1$  y en el crisol externo se tiene vidrio de índice  $n_2$ .

#### FIBRAS DE CRISOL DOBLE (DC)

##### COMPOSICION DEL VIDRIO

Los componentes principales del vidrio para fibras formadas según el método de crisol doble son óxido de sodio, trióxido de Boro y dióxido de Silicio, con otros óxidos. Se aparejan clases de vidrio adecuadas para vidrio de núcleo y vidrio de revestimiento con objeto de obtener una diferencia de índice de refracción que resulta en la apertura numérica deseada. Otro objetivo es que los coeficientes de dilatación térmica de ambos tipos de vidrio sean casi iguales para reducir las tensiones internas, un conte-

nido elevado de óxido de sodio resulta en cristalizaciones y ciertos compuestos con bajo contenido de óxido de sodio resultan en separación de fases con vidrio inestable que tiende a separarse en zonas ricas de dióxido de silicio y otras ricas en trióxido de boro lo que naturalmente es fatal para la atenuación y la resistencia mecánica.

#### PRODUCTOS DE LAS BARRAS INICIALES

Las materias primas principales para el vidrio son carbonato sódico, ácido bórico y dióxido de silicio en forma de polvos muy puros. Estos componentes se pesan, se mezclan y se funden en un crisol de cuarzo puro bajo control preciso de atmósfera. La temperatura es 1100-1300°C. Del carbonato sódico se desprende dióxido de carbono y del ácido bórico agua.

Una vez se ha preparado la masa de vidrio éste se estira en forma de barras a 850-950°C.

#### ESTIRADO DE LAS FIBRAS

Para cada fibra se necesitan dos masas fundidas, una para el núcleo con índice de refracción más alto y otra para el vidrio de revestimiento con índice más bajo.

Las barras primaria para vidrio de núcleo y vidrio de revestimiento se colocan en un crisol compuesto por dos crisoles concéntricos de metal, fig. 6. El vidrio fluye lentamente por boquillas del fondo de los crisoles. El vidrio del núcleo recorre un trayecto por el interior del crisol con el vidrio del revestimiento. La velocidad está regulada por la visco



alidad de los dos vidrios y por la temperatura, aproximadamente 1000°C. La temperatura es considerablemente menor que con el método CVD por lo que el horno puede ser más sencillo.

Desde la boquilla del crisol del revestimiento el vidrio se estira para formar la fibra; fig. 6. La protección del plástico, bobinado y control de calidad son similares a los mismos procesos para fibras CVD.

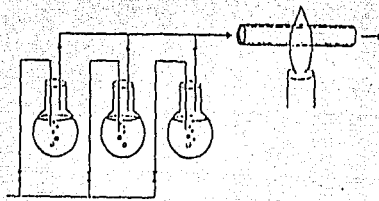


Fig. 5 Fundamento del proceso CVD. En cámaras de borboteo se satura oxígeno con los productos químicos deseados. El gas formado reacciona en un tubo de cuarzo depositándose vidrio en el interior del tubo.

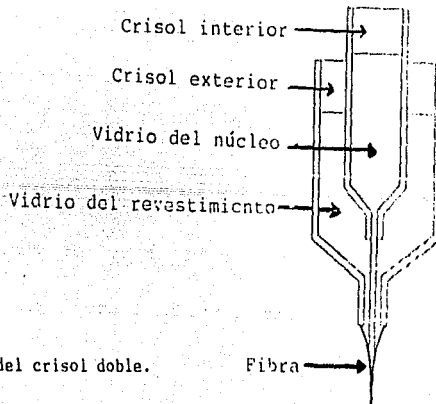


Fig. 6 Fundamento del crisol doble.

## PERFILES DE INDICES DE REFRACCION

Las primeras fibras ópticas tuvieron índice de refracción homogéneo\_ tanto en el revestimiento como en el núcleo. Esto se denomina índice escalonado. El siguiente paso fue la graduación del índice desde el valor del mismo en el revestimiento, hacia un valor más alto en el centro del núcleo. Todo esto era en fibras multimodales.

El advenimiento de las fibras unimodales se inició también con índices escalonados. Hoy se perfilan los índices de acuerdo a la particularidad de transmisión que se desea. Entre otros se tienen:

PERFIL TRIANGULAR - Para mover el punto de cero dispersión de 1300 - nm a 1550 nm;

PERFIL ESCALONADO O TRIANGULAR CON CLAD DEPRIMIDO -

Para aumentar la diferencia de índices y disminuir la atenuación;

PERFIL EN "W" - Para reducir la dispersión al mínimo desde 1300 hasta 1550 nm.

El método de crisol doble (DC) se presta particularmente bien para fabricar fibras de índice escalonado, con índice de refracción constante en el núcleo y transición abrupta al índice más bajo de refracción del revestimiento.

Este tipo de fibras es apropiado para transmisión para cortas distancias, hasta unos kilómetros.

Para transmisión por grandes distancias, que es normal en telecomunicaciones, las fibras con índice escalonado resultan en alta dispersión es decir, prolongación de los pulsos. En este caso se emplean preferentemente fibras con índice de refracción gradual a las que se les ha dado un perfil de índice de refracción precisamente optimizado, gradualmente decreciente desde el centro del núcleo hasta el revestimiento. El método CVD, de deposición por vaporización se juzga actualmente como el más apropiado para fabricar fibras con índice gradual.

#### OTROS TIPOS DE FIBRAS

Los métodos de fabricación descritos son fibras con vidrio tanto en el núcleo como en el revestimiento. Otras construcciones que han aparecido son las siguientes:

#### NUCLEO/REVESTIMIENTO

- (a) vidrio / vidrio
- (b) líquido / vidrio
- (c) vidrio / plástico
- (d) plástico / plástico
- (e) plástico / aire

Exceptuando el tipo (a), todas son índice escalonado. El plástico más común es el PMMA (poli-metil-metacrilado) o acrílico. Las fibras plásticas tienen atenuaciones más altas que las de vidrio. Sin embargo tienen amplias aplicaciones en redes locales y en vehículos. Las fibras del tipo (e) son las más sencillas, con mayores atenuaciones y aplicación par-

ticular en ornato. Las fibras plásticas son hechas por extrusión. En el caso del núcleo, son intolerables las burbujas e impurezas, ya que ellas son causas de aumentos en la atenuación.

## II.5 CABLES DE FIBRA OPTICA

El campo de empleo de un cable con fibras ópticas determina su número de fibras y decide el tipo de fibra a emplear. La forma de tendido por otra parte determina los requisitos sobre las características mecánicas del cable y su resistencia al ambiente.

Por lo que el diseño del cable debe dar a la fibra protección contra estiramientos, curvaturas, torceduras, vibraciones y aplastamientos durante la manufactura, instalación y operación. La fibra óptica debe ser igualmente protegida contra los efectos del medio ambiente a las variaciones de la temperatura, humedad, químicos y relámpagos.

Las fibras ópticas no deben curvarse excesivamente. Aún pequeñas curvaturas pueden incrementar pérdidas debido al escape de luz del núcleo de la fibra.

Cuando las fibras ópticas se someten a esfuerzos de tensión bajo condiciones ambientales difíciles, de temperatura y humedad, se ven expuestas a un proceso de envejecimiento que da como resultado la ruptura de la fibra en un cierto tiempo. Dicho proceso sufre una aceleración debido a la presencia de las "microcurvaturas", las cuáles se encuentran distribuidas aleatoriamente a lo largo de la fibra, tanto en forma superficial como interna. Así los esfuerzos de tensión se concentran en dichos "microdefec-

tos", propagándose conforme el esfuerzo permanece o aumenta. Con esto, - la resistencia mecánica de las fibras se reduce considerablemente.

En contraste con estos esfuerzos relacionados a las fallas instantáneas bajo una tensión aplicada, el fenómeno de fatiga estática se basa en un crecimiento lento de las microfisuras en la fibra. De esta manera, ante variaciones de temperatura y humedad, cambiando ciertos valores de tensión aplicada al cable (Tensión de trabajo) y resistencia inicial a la tensión de la fibra óptica, se produce un rápido envejecimiento de la fibra con la consecuente degradación y posible pérdida de la transmisión.

Es por esto que se debe tener sumo cuidado durante los procesos de fabricación e instalación, proveyendo a la fibra de las protecciones plásticas y metálicas más convenientes. De esta forma el tiempo de vida útil del cable se incrementa, protegiendo a las fibras ante la influencia del medio ambiente.

La F.O. como tal, núcleo y revestimiento de fábrica, se protege inicialmente con una capa de acrilato, que las protege contra la humedad, ya que el agua es altamente nociva para las fibras. Comúnmente el acrilato es de 250 micras, pero también se hace de 500 um. A dicho acrilato se le conoce como protección primaria.

La construcción de un cable se inicia con la protección secundaria que puede ser de 2 tipos holgada y adherida:

1 - CONSTRUCCIONES ADHERIDAS, en las que la fibra se encuentra inmersa en el material plástico. Es por ello que el comportamiento térmico

y mecánico de este influye directamente en la calidad de la transmisión.

2 - CONSTRUCCIONES HOLGADAS, caracterizadas por una estructura que permite a la fibra óptica un cierto grado de libertad (Margen de elongación -contracción), a fin de minimizar los problemas de curvaturas y microcurvaturas.

Actualmente la preferida es del tipo holgado. Ya que así no se transmiten directamente a la fibra muchos de los esfuerzos a que se someten los cables. La intención de la protección holgada es permitir a la F.O. un libre movimiento dentro de ella. Es claro entonces que un tubo termoplástico de unos pocos milímetros de diámetro, es diez veces el tamaño de la FO y es una adecuada protección secundaria holgada. En la mayoría de las fibras ópticas, hay dentro del tubo un compuesto gelatinoso que sirve como repelente a la humedad.

#### 1. CONSTRUCCIONES DENSAS

##### a) CONSTRUCCIONES DENSAS TRENZADAS.

Se emplea la extrusión de uno o más recubrimientos plásticos como refuerzos y protección de la fibra óptica antes de su ensamblado por grupos o capas. El uso de varias capas de recubrimiento disminuye las pérdidas por microcurvaturas generadas por la extrusión y el ensamblado. Se reducen también así las variaciones de la atenuación con la temperatura. En la fig. 6 se observa un cable de construcción adherida monofibra de 3 capas, en donde se aprecia un recubrimiento primario (Diámetro 250  $\mu$ m) sobre el que se aplica una capa espesa (Diámetro 0.45 mm) de resina de silicón -

que posee un bajo módulo de elasticidad mediante extrusión, se le recubre, con material termoplástico con un alto modo de elasticidad, y un bajo coeficiente de expansión térmica (Es) a fin de prevenir las pérdidas por microdobles causadas por la variación en la estabilidad térmica del material. En este caso, el silicón permite absorber las deformaciones de la fibra producidas por la tensión del trenzado, así como las inhomogeneidades de los parámetros geométricos y de los materiales en la capa extruida. También se reducen con esto los cambios en atenuación debidos a los efectos térmicos.

Las características de este cable le permiten un tamaño reducido y gran flexibilidad, además de lograr una continuidad de transmisión en el caso de alguna fisura en la fibra. Sin embargo, los materiales empleados son muy susceptibles a la absorción de iones OH y a la compresión lateral. Esto último lo hace de manejo delicado, pero la absorción de iones OH es intolerable, ya que al llegar estos a las F.O., las degradan rápidamente, incrementándose su atenuación. La absorción de estos iones se propicia en ambientes de alta humedad relativa.

#### b) CONSTRUCCIONES DE CINTAS DENSAS

Este tipo de estructuras maneja un gran número de fibras ópticas por cable con 12 F.O. se forman cintas, las cuáles se agrupan una sobre otra, hasta tener 12 cintas, así se forma una matriz de 144 F.O., esta matriz se aplica helicoidalmente para que soporte mejor los radios de curvatura a los que se somete el cable. Sin embargo, es importante que se tenga un control de la operación de torsión de la hélice, ya que ello puede causar es-

fuerzos mecánicos sobre la fibra, de acuerdo a su posición en la matriz. La fig. 7 muestra una estructura de 144 fibras ópticas constituyendo una matriz de 25 mm<sup>2</sup>. dicha matriz va cubierta exteriormente con una capa de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) de 12 mm de diámetro, este tipo de estructura se emplea tanto para fibras multimodales como unimodales. En este último caso se ha probado con una atenuación promedio de 0.38 db/km a 1310 nm y 0.23 db/km a 1550 nm de longitud de onda.

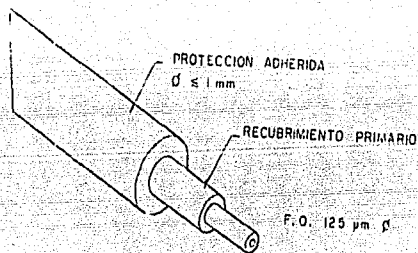


Fig. 6

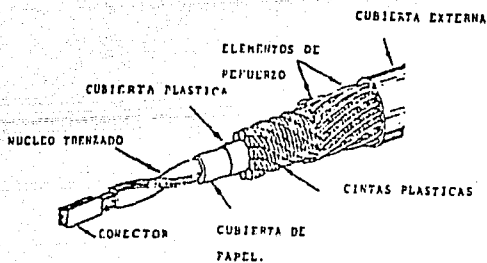


Fig. 7 Cable óptico que contiene 144 fibras



## 2. CONSTRUCCIONES HOLGADAS

Estas pueden ser: de fibras libres en tubos, de cintas con fibras y de estructura cilíndrica ranurada.

### a) ESTRUCTURA DE FIBRAS LIBRES EN TUBOS

El principio básico de estas estructuras es permitir un margen de elongación a la fibra óptica contenida en un tubo plástico extruido. Cada fibra contenida en dichos tubos presenta una ventana de elongación/contracción en la que la fibra óptica permanece libre de esfuerzos. Esta ventana se determina por el espacio interno de la fibra óptica en el tubo ( $W$ ) y el período de la hélice ( $U$ ) de la fibra dentro del tubo. En este caso, el margen de elongación puede llegar hasta 0.1%. Si se aumenta la carga de esfuerzo sobre el cable óptico, se disminuye el margen de elongación, la fibra óptica se encuentra sometida a un estado de esfuerzos de tensión, por lo que se empiezan a generar pérdidas por microcurvaturas en los puntos donde la fibra se apoya en la pared interna del tubo. Esta situación produce un incremento en la atenuación y en los efectos de fatiga estática.

Es por ello que para prevenir cambios irreversibles de la atenuación, o la ruptura de la fibra óptica, el cable debe mantenerse en un estado de esfuerzo de tensión por períodos cortos de tiempo, lo que implica necesariamente una reducción al máximo del tiempo del tendido, de manera contraria, también se puede presentar un incremento en el margen de elongación (Es) a causa del encogimiento de los materiales plásticos del tubo duran

te una baja en la temperatura de operación del cable. La atenuación permanece constante hasta que los efectos del enfriamiento producen un acortamiento de la hélice de la fibra, generando las pérdidas por doblamientos periódicos. Este efecto produce además una disminución de la ventana hacia la contracción.

Esta estructura de tubos pueden ser seca o rellena. Los enlaces - instalados han demostrado que la mayoría de las aplicaciones operan mejor rellenas. Además de actuar como una barrera contra la migración del agua al interior del tubo, dicha gelatina le sirve como amortiguador a la fibra. Con esto se evita el rozamiento de la misma con las paredes del tubo que la contiene, es conveniente aplicar también una gelatina sobre los tubos cableados.

#### b) CONSTRUCCIONES DE CINTA CON FIBRAS LIBRES

La estructura consta de una cinta de 5 alveolos en forma hexagonal, - con círculo inscrito de 450  $\mu$ m de diámetro, el cable óptico se construye termosellando dos bandas de aluminio cubiertas en sus caras opuestas por una película de polietileno, se acoplan en grupos de 10 y se envuelven en dos cintas protectoras, con un esfuerzo de material plástico y enrollados en una espiral. Dicha estructura tiene ventajas sobre la afectabilidad de los esfuerzos mecánicos, comparativamente con las estructuras de cinta densas.

#### c) ESTRUCTURA CILINDRICA RANURADA

El elemento del cable se forma por un cilindro ranurado en "v" (ver

fig. 8) de diámetro (D) en el que se alojan libremente las fibras ópticas de diámetro exterior ( $d_e$ ) (RECUBRIMIENTO PRIMARIO) con lo que se les permite un margen de elongación. Las ranuras se disponen en espiral con una profundidad (h), y un paso helicoidal (p) continuo o alternado (S-Z), lo que permite por una parte, mayor holgadura a las fibras ópticas librándolas de esfuerzos mecánicos dentro de un cierto rango de elongación / contracción. Por otra parte, debido a que el cable puede someterse a condiciones de elongación prolongadas, se requiere agregar una longitud adicional de fibra óptica nucleada en las ranuras, a fin de aumentar el rango de trabajo. El cilindro ranurado se refuerza por un miembro central de diámetro ( $D_p$ ), logrando un mejor comportamiento térmico y mecánico del cable ( $R_r$ ,  $R_e$ , PORCENTAJE DE ELONGACION AZ, COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA). Así, el paso de la hélice (p), su profundidad (h) y las curvaturas debidas al cable ( $P_s$ ), son factores importantes en cálculo del margen de elongación de la fibra, y de la calidad de la transmisión.

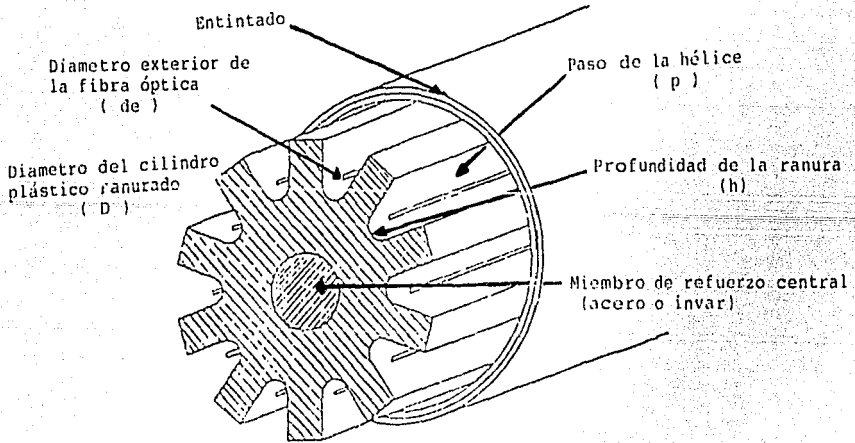


Fig. 8 Estructura cilíndrica removedora en "V"

## PROCESOS DE MANUFACTURA EN CABLES DE FIBRA OPTICA

Para la fabricación de los cables de fibra óptica se requiere de maquinaria diversa y especializada para cubrir cada uno de estos procesos con una alta calidad. En algunos de los procesos emplean principios basados en la manufactura de cables tradicionales de telecomunicaciones. En estos casos se han requerido adaptaciones para manejar las condiciones a las que se ve sometida la fibra óptica sin degradar sus características principalmente en la calidad de transmisión esperada. A continuación se presenta en secuencia cronológica las diferentes etapas que se requieren para la manufactura de los cables ópticos.

### 1. CABLES OPTICOS MULTIFIBRAS

#### a) ENTINTADO

Una vez que la fibra óptica ha sido recibida, inspeccionada y autorizada para la fabricación de un cable óptico, la primera etapa a la que ingresa es la de entintado. Cada una de la fibras es pintada con un determinado color. Para su identificación en un cable terminado al manejarse una construcción de más de una fibra por tubo, (Minitel o Tetratel).

El proceso consiste en desenrollar la fibra a través de un mecanismo de tensión controlada y pasarla por un baño de tina especial (de secado rápido), e inmediatamente introducirla a un horno de secado con aire caliente, posteriormente se recupera en un enrollador con un control de paso muy fino, a fin de asegurar el mismo paso con el cuál el fabricante entrega la fibra. También se precisa un control de tensión específico y -

constante, para evitar algún deterioro en la calidad de la fibra óptica.- Alternativamente a este proceso de curado "térmico", existe otro de curado "ultravioleta" que permite aumentar la productividad, con una calidad comparable o mejor a la del proceso anterior.

#### b) EXTRUSION

Este proceso puede realizarse de varias maneras dependiendo del tipo de construcción a fabricar, para una construcción adherida, la fibra no pasa por la etapa de entintado y se le aplica una capa termoplástica adherida (Nylon, por lo general) la cuál puede ser natural o de color para identificación como cable terminado.

Cuando se fabrica un cable con tubos que contienen una o más fibras, se pueden manejar secos o rellenos de gelatina. La gelatina es para evitar la migración de la humedad al interior del tubo y a la fibra, en caso de algún daño en el cable.

La fabricación del tubo es por un típico proceso de tabulado, donde las fibras entran a la cabeza de extrusión con una tensión constante, prácticamente al mismo tiempo que la gelatina, formándose el tubo que alberga a las(s) fibra(s). Dicho tubo se enfría a través del canal de enfriamiento y se recupera en un enrollador con control de tensión constante.

En el caso del núcleo ranurado, este se fabrica por medio de una cabeza con dado giratorio y elemento central fijo. Así se logra la formación de una estructura con un paso helicoidal unidireccional, o del tipo-

S-Z. Un núcleo de este tipo puede albergar una o más fibras por ranura, al igual que en el caso de la estructura en tubos, la fibra será natural cuando se emplea una por ranura, y diversos colores cuando se colocan varias F.O. en una misma ranura, para su identificación.

c) CABLEADO

Para el proceso de cableado se dispone de diversas maquinarias dependiendo de la estructura a fabricar. En el caso de una estructura adherida esta se puede fabricar con un paso helicoidal unidireccional tanto en una cableadora tipo planetaria, este tipo de maquinaria tiene la desventaja de ocupar un gran espacio cuando se requiere de un gran número de fibras en el cable. Otro tipo de máquina es una cableadora tubular, la cual presenta mayores limitaciones de espacio alternativamente se puede realizar un proceso de cableado S-Z, que requiere también de un gran espacio conforme el número de fibras aumenta.

Para las estructuras de tubos holgados, se pueden emplear procesos de cableado helicoidal en cableadoras tubulares o planetarias, con la ventaja de requerir menor espacio al manejar el concepto multifibra otro tipo de cableado es con un paso S-Z, por medio de una cableadora para este propósito, con control de tensión, constante en cada posición.

En estructura de núcleo ranurado, las fibras se depositan con un control de tensión constante en cada una de las ranuras, una vez reunidas todas ellas alrededor de un elemento central metálico dieléctrico, son traccionadas mediante un capstan y recibidas en un enrollador con tensión constante durante todo el proceso.

#### d) PRIMERA CUBIERTA Y REFUERZOS MECANICOS TEXTILES

Una vez que se han reunido en una o más capas las fibras para formar un núcleo óptico, se pueden proteger contra los diversos agentes externos que las rodean durante su operación. Para ello se le aplican una o más cubiertas de material termoplástico. En algunas ocasiones la aplicación del cable en particular requiere de una estructura totalmente dieléctrica por lo que se emplean diversas fibras textiles para reforzar mecánicamente a la estructura durante las operaciones de instalación. Estas se aplican en varias capas y de manera homogénea a fin de aprovechar óptimamente sus características mecánicas. El proceso de aplicación de cubiertas se realiza de la misma forma que para un cable de cobre. La aplicación de refuerzos textiles se hace de manera independiente en una máquina similar a las encintadoras, con cabezas múltiples, para colocar los carretes de los textiles.

#### e) CUBIERTA POLIACERO

En esta etapa de fabricación del cable se busca la protección mecánica de las fibras, en particular ante el posible ataque de roedores, mediante la aplicación en TANDEM de una cinta longitudinal de acero corrugada y una cubierta de material termoplástico. Dicha construcción además ofrece la ventaja de una mayor flexibilidad con respecto a una armadura de fleje de acero aplicada helicoidalmente, y una mayor productividad en este proceso. En el caso de una instalación en ductos normalmente es suficiente una sola cubierta poliácero. Sin embargo, en aplicaciones de cables directamente enterrados, se pueden llegar a emplear hasta dos o tres

cubiertas de este tipo, a fin de garantizar la protección mecánica del cable.

## 2. CABLES TERMINALES

Para la fabricación de cables terminales (PIGTAILS) se requiere partir de una fibra óptica a la que se le aplica una protección adherida. Sobre esta se colocan en TÁNDEM un refuerzo mecánico textil y una cubierta externa de un material retardante a la flama, ya que por lo general dicho cable se emplea para interiores en oficinas. Esta construcción puede realizarse con una o dos fibras ópticas, dependiendo si se emplea en comunicaciones uni, o bidireccionales en el caso de dos fibras, esto se realiza mediante la unión de dos cables de una fibra, a los que se les aplica una segunda cubierta del mismo material para darle una estructura más compacta. Su aplicación específica demanda de longitudes muy cortas para interconexión entre los equipos terminales y el cable óptico multifibra. Por lo general se instalan en algunas decenas de metros.

## 3. OTROS CABLES

Quando se requiere la fabricación de un cable híbrido para telecomunicaciones (pares metálicos y fibras), normalmente los pares se integran al cable como una posición más dentro de la cableadora, o bien se colocan en alguna de las ranuras disponibles dentro de la estructura. Cabe indicar que durante este proceso puede agregarse o no una gelatina de relleno intersticial para protección contra la migración de la humedad al cable.

## II.6 INSTALACION Y EMPALMES



## 1. INSTALACION

La utilización de las fibras ópticas (F.O.) es una realidad gracias a las diferentes protecciones que se les aplican afin de conformarlas en un cable. Los cables más importantes por su capacidad en F.O. y fibras de ingeniería asociadas, son las multifibras, es decir, aquellos con seis o más F.O. Dichos cables tiene en general un elemento central alrededor del cual depositan o cablean las F.O. ya con su protección holgada adherida. Sobre el cableado se aplican como protección una o más cubiertas plásticas y muy frecuentemente una armadura de acero e incluso elementos textiles de refuerzo.

El elemento central o núcleo de tracción debe tener rigidez mecánica adecuada para soportar el peso del cable y las tensiones de instalación a lo largo de la longitud total o tramo de cable que se va a manejar. Si la tracción se hiciera solamente sobre el núcleo, tanto el cableado como las cubiertas podrían retraerse. Es por ello que también la cubierta exterior y en su caso los refuerzos textiles intermedios, se utilizan para el halado del cable. Esto aumenta el factor de seguridad la operación.

Cuando el elemento central del cable es metálico, es suficiente hacerle un bucle, para así sujetarse con el cable de tracción. El halado suele hacerse con un cable de acero, que tiende a torcerse. Por tanto entre ambos cables es necesario instalar un destorcedor que evite esfuerzos adicionales en el cable óptico.

Para sujetar la cubierta exterior se utiliza una malla metálica, co-

munmente conocida como "CALCETIN", si no se dispone de ella, puede elaborarse manualmente con alambre de acero una vez aplicado el CALCETIN, a este se sujeta también el núcleo de tracción y en su caso, elementos textiles de refuerzo mecánico.

## 2. EMPALMES

Todos los cables de F.O. se hacen en longitudes finitas. Así es necesario unir un tramo con otro, a fin de lograr realizar un enlace entre dos puntos distantes algunos kilómetros. Dicha unión o concatenación es un trabajo que requiere de mano de obra muy bien calificada. La unión de las F.O. en sí, se hace con equipo especializado que permita un corte adecuado y la unión propia de las F.O.

El corte de las F.O. debe hacerse perpendicular al eje de la misma, con un error menor a 3 grados. Dicho corte generalmente se hace por fractura, pero debe ser con la suficiente delicadeza para no dejar astillas en la superficie. La limpieza de esta operación es primordial ya que las partículas de polvo, grasa y agua son de dimensiones comparables a las del núcleo de la F.O.

Para poder empalmar las fibras se deben primero quitar ambas protecciones primaria y secundaria.

Previo a la unión, las dos F.O. deberán alinearse en ejes, x,y,z, incluyendo una rotación con respecto al eje de la misma. Para esto, el equipo a utilizar deberá permitir todos esos grados de libertad al menos en una de las F.O., en tanto que la otra deberá tener como mínimo el movi

miento del eje Z, colineal con el eje de la F.O. los ajustes en estos movimientos deben ser micrométricos, dadas las dimensiones de las fibras.

La unión permanente de las F.O. se logra por fusión del material que - las forma. Los métodos más comunes para lograr la fusión son una microflama de gas y un arco eléctrico el primero es más delicado, tanto en la pureza de los gases como en el sistema de aplicación. El arco eléctrico es muy común, más sencillo de realizar (fabricación y uso) y más limpio (menor riesgo de micropartículas).

Alineadas las F.O., estando separadas aprox. 100 micras, se aplica una primer descarga o "prefusión", que limpia y condiciona las fibras. A continuación se acercan a tope, y se inicia la descarga para la fusión de no avanzar más las F.O., el material se adelgazaría en el punto de fusión, formando un microcuello que limitaría el paso de luz. Cada etapa, prefusión, avance y fusión, requieren un control adecuado de sus tiempos de duración. Los valores típicos son décimas de segundo para los dos primeros y 5 segundos. para el tercero el arco en si es de 3 KV con 20 mA todos estos valores son regulables e incluso programables en la mayoría de los equipos empalmadores por fusión.

### 3. CIERRE DE EMPALMES:

Los cables ópticos son generalmente herméticos, para mayor seguridad de las F.O., sin embargo para realizar la unión de 2 tramos es necesario tener las F.O. al descubierto, esto induce a cuestionar como protegerlas en el punto de empalme la solución es tener una envolvente que incluya tan

to a los empalmes de las F.O. como una sección de ambos cables.

Dicho envoltente es conocido como cierre de empalme, dicho cierre es necesariamente hermético en su totalidad y en particular alrededor de los cubles, dentro del cierre hay generalmente una ó mas charolas (organizador)- donde se distribuyen comodamente los excesos de F.O. y se dejan y protegen los empalmes tales excesos en longitud son de uno a dos metros por fibra,- por cable, esto se hace a fin de poder trasladar el empalme de las F.O. desde el equipo de fusión hasta el organizador, adicionalmente se tiene con esto una longitud de reserva para el caso en que se requiera intervenir el empalme, lo cuál es común para casos de localización de fallas y modificaciones en los enlaces.

Una vez soldada la fibra deberán restablecerse sus protecciones primaria y secundaria.

Para realizar los empalmes entre tramos, pueden hacerse las mediciones con la fibra desnuda en los extremos del enlace, para llegar a los equipos de transmisión y recepción, es necesario conectar o rematar el cable con cables terminales (pigtaills). Estos remates son cables cortos (5,10,15 mt) y en su extremo llevan aplicados los conectores antes de conectar los cables terminales.

## II.7 CONECTORES

A) La interconexión en sistemas de comunicación por fibra óptica, se soluciona básicamente por dos métodos: empalmes y conectores.

Los empalmes se utilizan cuando se requiere una conexión permanente o -

semipermanente entre dos fibras y pueden ser elaborados por fusión o acoplamiento mecánico.

Los conectores son usados para dar flexibilidad y facilidad de conexión y desconexión entre sistemas de fibra y un componente activo (led, laser, PIN, APD etc.), estos conectores son por lo general elementos mecánicos de muy alta precisión.

B) Pérdidas en un conector óptico.

La interconexión de dos fibras es una de las partes críticas en un sistema de transmisión por fibra óptica. Esta unión es sensible de tener pérdidas en la potencia óptica por diversos factores que están en función del alineamiento físico de los 2 núcleos y de la calidad de su acabado. Las pérdidas son intrínsecas cuando son atribuibles a defectos en el dimensionado de las fibras o en sus especificaciones ópticas. Son extrínsecas, o de inserción, cuando se pueden atribuir al diseño y/o acabado del conector (tabla 1).

TABLA 1. PERDIDAS EN UNA CONEXION OPTICA

<u>INTRINSECAS</u>	<u>EXTRINSECAS</u>
* Variaciones entre diámetros de núcleo.	* Desplazamiento lateral.
* Distinta apertura numérica.	* Desalineación angular.
* Excentricidad del núcleo.	* Separación entre las caras de las fibras.
	* Calidad del acabado.

## 1. PERDIDAS INTRINSECAS

### a) Variaciones entre los diámetros de los núcleos.

Cuando se unen dos fibras con núcleos de distintos diámetros, el solapamiento de las dos áreas produce una pérdida tanto en la dirección del diámetro mayor al menor, como del menor al mayor.

En el primer caso, la pérdida es debida a que existe una cantidad de modos que se pierden al entrar directamente al revestimiento de la fibra con núcleo menor. En el segundo caso, esta pérdida se produce como resultado de una nueva redistribución modal.

### b) Distinta apertura numérica.

Cuando se conecta una fibra de alta apertura numérica ( N.A. ) a otra de menor N.A., se produce una pérdida por los modos que no " guía " o capta la fibra de menor N.A. ( relación índice de refracción con la -- N.A. ).

### c) Excentricidad del núcleo.

La excentricidad del núcleo también causa pérdidas debido al solapamiento de las áreas. ( Fig. 9 ).

## 2. PERDIDAS EXTRINSECAS

### a) Desplazamiento lateral.

El desplazamiento lateral (Fig. 10) es debido a tolerancias en la manufactura del conector y el efecto es similar al que ocurre cuando hay excentricidad del núcleo, produciéndose una atenuación de 75 dB con una relación Desplazamiento Lateral (L)/ Diámetro (D) de 10%. Estas tolerancias se hacen especialmente críticas en conectores unimodales donde un desplazamiento de 2 micras, produce una pérdida de .5 dB.

### b) Desalineación angular.

Cualquier ángulo entre las caras de las fibras, produce pérdidas. La desalineación angular (Fig. 10), es producida por el pulido ó corte de la fibra, o también por un mal diseño del conector. Esta pérdida depende de la apertura numérica de la fibra óptica, siendo menor la pérdida al aumentar la N.A. de la fibra.

### c) Separación entre las caras de la fibras.

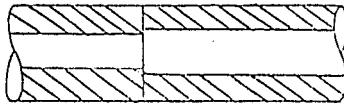
La separación entre las caras de las fibras (Fig. 10), tiene influencia en el aumento de atenuación en una interconexión óptica, siendo mayor a medida que aumenta la apertura numérica.

### d) Calidad en el acabado de las caras.

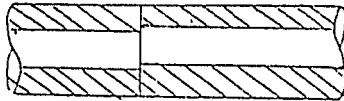
Existe otra causa más para producir pérdidas entre conectores, y esta es la atenuación por el efecto Fresnel que ocurre cuando dos fibras están separadas por aire (Fig. 10). Esta pérdida aumenta con las imperfecciones de las caras de las fibras, por lo que se exige un pulido a espejo en la mayoría de conectores.

El efecto Fresnel consiste en pérdidas por reflexión que ocurren cuando la luz transmitida por la fibra óptica cambia de un índice de refracción a otro. Las pérdidas por efecto Fresnel, se pueden disminuir e incluso suprimir logrando un contacto físico entre las dos fibras eliminando así el cambio del índice de refracción.

#### PERDIDAS INTRINSECAS



a) Distinto diámetro de núcleo.



b) Excentricidad del núcleo.

Fig. 9



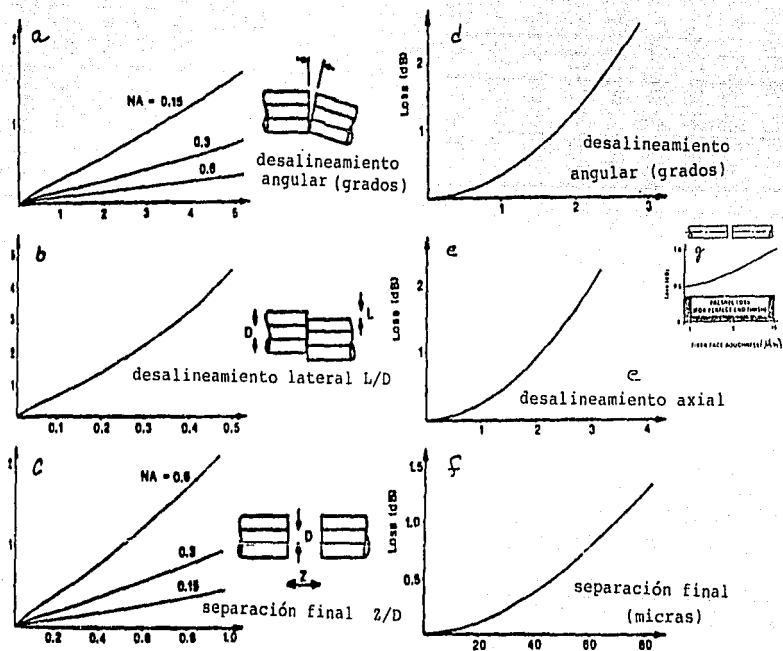


Fig. 10 Pérdidas extrínsecas. a-c y g) fibra multimodo, d-f) fibra unimodo.

c) Tipos de conectores.

1. Para la evaluación de un conector, es necesario tener en cuenta las siguientes características.

- \* Baja pérdida por inserción.
- \* Facilidad de montaje.
- \* Compatibilidad con distintos fabricantes del mismo conector.
- \* Pequeña variación en la pérdida por inserción después de un

gran número de conexiones y desconexiones (repetitividad).

\* Insensibilidad a factores ambientales (temperatura, polvo, etc.).

\* Buena relación costo/beneficio.

## 2. Conectores para fibra multimodal.

### 2.1 El conector SMA, un conector tipo.

Dentro de los muchos diseños, especificaciones y fabricantes de conectores para fibra multimodal, aproximadamente el 80% del mercado esta cubierto con conectores SMA (Subminiatura tipo A) desarrollo por AMPHENOL PRODUCTS.

El SMA, su atenuación oscila de .5 dB a 2 dB, dependiendo de la versión. Las partes que constituyen un conector SMA, se pueden considerar básicas en el diseño de un conector óptico, por lo que vamos a describirlas detalladamente.

\* FERRULA.- Es la parte principal de un conector óptico, pues es el elemento que contiene en su interior la fibra óptica, ayudando a su alineación. En los conectores SMA, existen dos versiones de ferrula, tipo 905 y tipo 906. El tipo 905 es el diseño original y tiene una respuesta adecuada en empalmes terminales. Pero sus cualidades resultan bajas en donde se requiera acoplamiento entre conectores. Pensando en estas últimas aplicaciones, se diseñó el tipo 906 que soluciona en parte los problemas del 905 en cuestión de alineación. En el conector SMA, la longitud de la ferrula es crítica.

\* TUERCA DE ACOPLAMIENTO.- Es el elemento mecánico que sujeta el conector al receptáculo del transmisor o del detector.

\* CUERPO.- Es la parte del conector en donde se inserta el pigtail y la cuál soporta los distintos elementos del conector. En el conector SMA la férula está integrada al cuerpo.

\*CASQUILLO DE SUJECCION.- Es el elemento que asegura la tracción del pigtail por medio del kevlar.

\* BUJE PROTECTOR.- Es una pieza de plástico moldeado, o de spaguetti termocontráctil, que cubre el casquillo de sujeción y parte del cuerpo para mejorar la protección y la apariencia del conector.

## 2.2. Conector S.T. (mini BNC).

Desarrollado por AT & T.

El S.T. (Fig. 11) tiene una configuración parecida a la del conductor SMA, pero con características superiores. Sus ventajas son:

1. Férula cerámica de precisión, que mejora la alineación al tener tolerancias de 2 micras.
2. Dispositivo de fijación, que evita la rotación obteniendo así mayor repetitividad.
3. La tuerca de acoplamiento no es roscada, sino del tipo bayoneta que hace que la conexión y desconexión sea más rápida.
4. Atenuación típica de .4 dB.

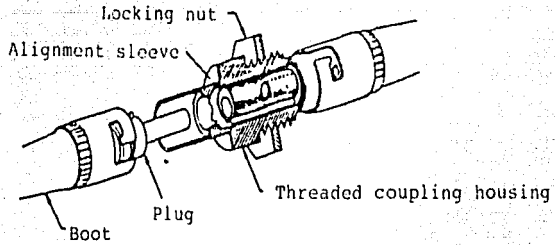


Fig. 11 Pareja de conectores S.T. con cople.

### 3. Conectores para fibra unimodal.

En aplicaciones donde se requiere un gran ancho de banda y una baja atenuación, como por ejemplo en compañías telefónicas, se hace necesario el uso de fibra unimodo.

#### a. Conector NTT-FC.

El conector FC (Fig. 12), fué en principio desarrollado para la NTT (Nippon Telephone and Telegraph) de Japón. Este conector consta de una férula metálica que contiene un elemento de cerámica capilar, el cuál es el encargado de alinear la fibra. Las tolerancias de concentricidad y diámetro de orificio, no sobrepasan tolerancias de 1 micra, asegurando una atenuación menor de 1 dB. El F.C. incorpora una rondana de ajuste que asegura:

1. Optimización de la menor pérdida al tener ocho posiciones distintas.
2. Mayor repetitividad al fijar la posición de la férula.

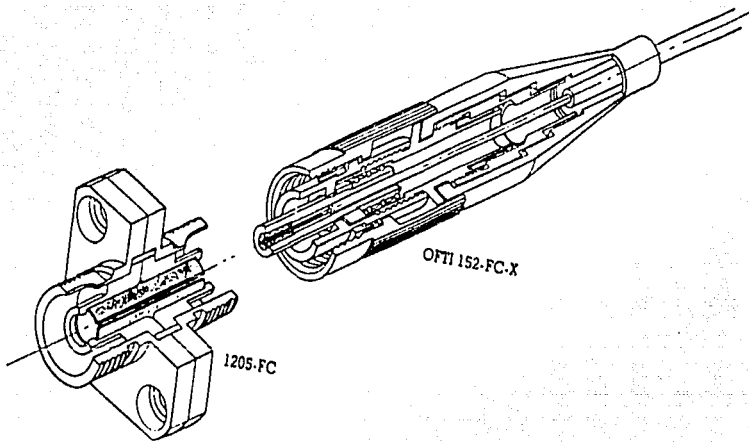


Fig. 12 Corte transversal. Conector FC y cable.

b. Conector F.C. / P.C.

Como se comentó en el inciso B.2.d, parte de la luz incidente en el extremo pulido de una fibra, es reflejada debido al efecto Fresnel. En conectores unimodales convencionales esta reflexión se calcula en aproximadamente 3% de la luz incidente, lo cual equivale a .15 dB de atenuación por esta causa. Para eliminar la atenuación debido a esta causa sin usar un fluido igualador de índice, se creó el conector de contacto físico FC/PC y se le proporciona a la terminación de las caras un pulido convexo que permite el contacto físico entre las dos caras. En la Tabla 2 se pueden comparar los valores típicos de atenuación del conector F.C. y F.C. / P.C.

Tabla 2

CONECTORES	PERDIDA INSERCIÓN (dB)	PERDIDAS RETORNO (dB)
FC	0.7	13
FC/PC	0.2	28

C. Conector bicónico.

Desarrollo también por AT & T, (Fig. 13 a,b) El conector bicónico, es el dispositivo más popular de haz expandido. Consta de una fémula cónica insertada en un cuerpo metálico y una tuerca de acoplamiento de material plástico. La cara de la fibra esta cubierta de epoxy moldeado que hace la función de un lente. Su pulido y ajuste es algo complejo, por lo que se han desarrollado versiones de acoplamiento fibra/fibra.

D. Conector temporal (laboratorio y campo).

El conector más sencillo y más utilizado en un laboratorio de pruebas y en el campo, consiste en tan sólo 3 pequeñas barras circulares. Teniendo una más corta, las otras dos servirán de guía para llevar las F.O. al interior del conjunto. Previamente, en dicho interior se ha depositado un medio de acoplamiento y minimizará las reflexiones en las superficies (bien cortadas) de ambas fibras.

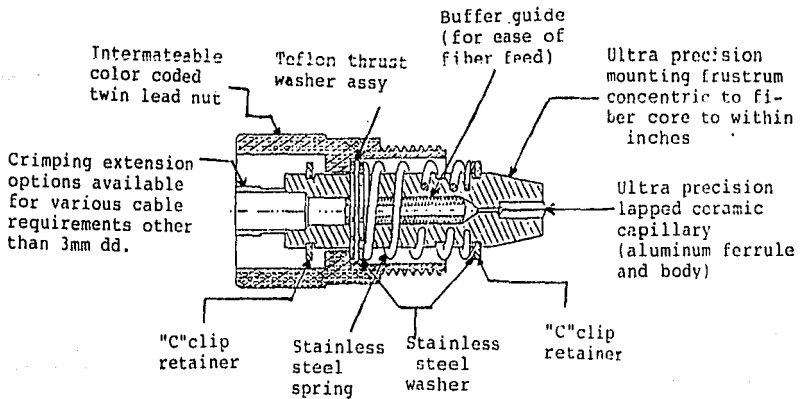


Fig. 13a Corte transversal conector bicónico OPTI.

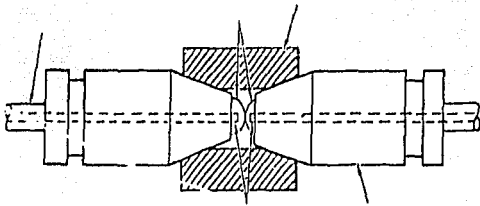


Fig. 13b. Corte transversal de una pareja de conectores bicónicos.

D. Proceso de ensamble.

Las partes en las que se divide el ensamble de un conector, son las siguientes:

1. Preparación del cable terminal.
2. Ensamble del conector.
3. Pulido.

1. PREPARACION DEL CABLE TERMINAL (PIGTAIL)

El primer proceso consiste en preparar el pigtail con las dimensiones especificadas por el fabricante del conector, tanto en lo que se refiere al kevlar como a la (s) cubierta (s). Esta operación también incluye una limpieza cuidadosa de la fibra.

2. ENSAMBLE DEL CONECTOR

En la segunda operación, se ensamblan las distintas partes del conec-

tor introduciendo la fibra por el orificio de la férula, no sin antes haber aplicado la resina epóxica.

Posteriormente se sujetan los elementos de tracción, se cura el epoxy y se corta la fibra sobrante.

### 3. PULIDO

El pulido es la parte más delicada del proceso, tanto en el ensamble, como en el apego a las especificaciones del fabricante. El proceso puede ser manual o auxiliado de máquinas pulidoras. El procedimiento consta normalmente de tres pulidos:

- \* GRUESO (12 micras). Para eliminar el exceso de epoxy.
- \* MEDIO ( 3 micras).
- \* FINO (.3 micras).

## II.8 Fuentes de luz, transmisores y receptores.

### A) Fuentes de luz.

#### 1. CONVENCIONALES

Siendo la electricidad y la luz de la misma naturaleza, ondas electromagnéticas, resulta evidente que una pueda dar origen a la otra. Las celdas solares son un ejemplo. Fue Thomas A. Edison quien desarrolló la fuente de luz convencional más común en los tiempos modernos, olvidándonos del fuego.

La lámpara incandescente es una bombilla de vidrio, el vacío, dentro de la cuál hay un filamento metálico. El filamento es en sí la fuente -



de luz, ya que se calienta al rojo-blanco por efecto de la corriente eléctrica que ahí circula y de la resistencia eléctrica del mismo. Dicho calentamiento es debido al choque de los electrones en la estructura del metal. El vacío se hace para evitar la rápida oxidación del metal bajo las severas condiciones térmicas a las que es sometido.

Otra fuente de luz muy común hoy día son las lámparas fluorescentes. Estas consisten en un tubo lleno por un gas a baja presión, así como un par de electrodos al que se aplica un alto voltaje, por medio de la balasta, ocasionando un arco eléctrico. Este arco excita las moléculas del gas y de ahí la generación de luz. Los gases más comunes son el neón y el vapor de sodio.

Para entrar a la fuente de luz modernas, haremos una breve descripción de los materiales.

## 2. SEMICONDUCTORES

En un material dieléctrico los electrones están fuertemente ligados al sistema atómico y es muy difícil interactuar con ellos. A diferencia de esto, en un metal hay exceso de electrones libres y eso propicia la fácil conducción de una corriente eléctrica (flujo de electrones).

Los materiales semiconductores naturales son los del Grupo IV de la Tabla Periódica. En la órbita externa tienen cuatro electrones que pueden liberarse, o bien se pueden atrapar cuatro electrones para completar esa órbita a un total de ocho electrones. En consecuencia, se tiene una banda de valencia y una banda de conducción. En la primera están atrapados los electrones, y en la segunda ellos quedan libres para participar en la con-

ducción de la electricidad.

Actualmente hay una gran variedad de materiales semiconductores compuestos, formados por combinaciones de elementos de los grupos II, VI, o bien de los grupos III.- V. Estos últimos han sido los más exitosos para la generación de luz. Esto ha sido porque la transición de un electrón (excitado) de la banda de conducción a la banda de valencia, se hace mediante la emisión de un fotón. Dicho fotón tiene una energía exactamente igual a la diferencia entre esas dos bandas (niveles energéticos).

Este breve tecnicismo da pie a la explicación de las fuentes de luz que identificamos como:

### 3. ELECTRONICAS

En algunos tipos de semiconductores, los fenómenos de relajación mencionados son similares a los que ocurren en los gases a causa de un flujo de electrones, pero los voltajes y las corrientes de trabajo son mucho menores.

A tales dispositivos se les conoce como diodos electroluminiscentes, más popularmente LED, light emitting diode. Estos tienen en general una amplia superficie de la que surge la luz, por lo que se le denomina SLED, surface LED'S, de emisión superficial.

Como cualquier otra fuente de radiación, antena, foco, etc. Los LED'S tienen un patrón de radiación. Los SLED'S tienen conos de emisión del orden o mayores a los 20° (grados angulares, generalmente mayores a la apertura mecánica de las FO-MM. Es por ello que tienen baja eficiencia de aco-

plamiento y requirieron el desarrollo de otro tipo de dispositivo.

Una fuente de luz más direccional son los ELED'S, edge emitting, -- LED'S, de emisión de borde. Como se indica, éstos tienen un patrón de ra diación a partir de una orilla de la unión p-n del diodo semiconductor. Es to se puede visualizar como una ventana rectangular, con un lado angosto, - por donde se emite la luz. Aún cuando estos dispositivos son en efecto - direccionales, existe otro tipo de fuentes más direccionales.

Los láseres son la sofisticación última dentro del grupo de fuentes - que estamos considerando. LASER es realmente el acrónimo correspondiente a Light Amplification by Stimulated Emmission of Radiation, amplificación - de la luz por emisión estimulada de la radiación. Adentrándonos en este concepto, una molécula en estado excitado pierde esa energía en forma - eventual y la referimos como una emisión espontánea. Más si esa energía es - liberada por la presencia de un fotón idéntico al que está por salir, ha blamos de una emisión estimulada. Esto es el efecto láser, en el que sa- len dos fotones, uno que llega y otro que se genera en la molécula por efec- to del primero. Si llega uno y salen dos, se tiene entonces una ganancia /amplificación (Ver Fig. 13). La realización práctica de estas fuentes - de luz y osciladores, fue inicialmente con medios gaseosos como el He-Ne. - Hoy día hay una gran variedad de medios activos.

Además del medio activo se requiere una cavidad resonante, la cuál lo contiene y propicia la oscilación del campo electromagnético generado en - su interior. Tal cavidad se construye con dos espejos cóncavos, o bien - uno plano y uno cóncavo. En los diodos láser (LD, laser diode) se emplean

dos espejos planos, cuyo perfecto paralelismo es posible gracias a que tales espejos son los dos cortes en los extremos del cristal en el cual se forma el diodo de semiconductor.

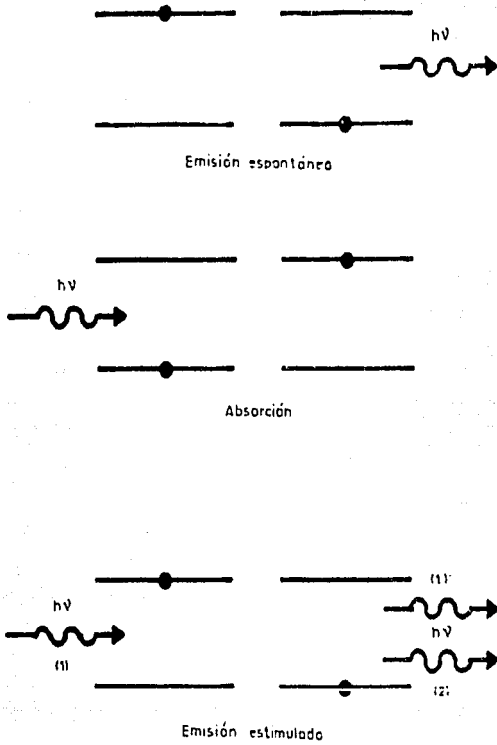


Fig. 13

### B. Transmisores ópticos.

Los transmisores acoplados a las F.O. son interfaces optoelectrónicas, diseñadas para convertir una señal eléctrica de comunicación en una señal óptica. Es por ello que en estas interfaces se tiene como entrada una se

ñal eléctrica, que puede ser de audio, de video, de datos, o una señal de control. En el interior se tiene un circuito electrónico con el cuál se alimenta a una fuente de luz, LED ó láser (LD), lo que genera la señal óptica a transmitir.

El circuito electrónico mencionado puede ser tan sencillo como un amplificador de acoplamiento. Así solamente se transfiere la señal recibida a la fuente de luz, para ser transmitida a través de la F.O.

Para transmisores más elaborados, el circuito citado no solamente recibe la señal eléctrica, sino que la modula, ó la codifica. En cualquiera de los casos, el propósito es asegurar una transmisión adecuada. Con una modulación generalmente se traslada la señal a una mayor frecuencia, la de la portadora.

Un cambio en la codificación es deseable para adicionar bits redundantes a fin de detectar, y en lo posible corregir, errores azarosos en la comunicación. Bien podrían transmitirse directamente los códigos de la señal entrante, sin embargo es una práctica común el cambio de código para garantizar una adecuada y confiable comunicación.

#### 1. Características de los LED'S.

- \* Buena linealidad con respecto a la corriente inyectada.
- \* Bajas variaciones por efectos térmicos.
- \* Operación en amplio rango de temperatura.
- \* Modulación limitada de 50 a 100 Mhz.
- \* Patrón de emisión pobre.

## 2. Características de los LD'S.

- \* Mayor directividad.
- \* Mayor potencia acoplada en la fibra óptica.
- \* Posibilidad de modulación hasta 8 Ghz.

## 3. Transmisores, Cuadro Comparativo

	LED	LD
Potencia óptica del componente	1 mW	10 mW
Potencia útil acoplada en fibra	0.1 mW	2 mW
Corriente de operación	100 mA	30 mA
Corriente de disparo	-- --	100 mA
Ancho de banda espectral	40 nm	3 nm
Ancho de banda eléctrico	100 Mhz	8 Ghz
Temperatura máxima de operación	80 °C	50 °C
Tiempo de vida esperado	1,000,000 hrs.	100,000 hrs.
Facilidad de uso	+	-
Tipo de fibra	MM	MM,UM
Patrón de radiación	amplio	direccional
Perfil espectral	Gaussiano	Lambertiano
Longitud (Es) de onda	850,1300 (nm)	850,1300,1550 (nm)

## C. Receptores ópticos.

Los receptores ópticos, o fotoreceptores, son dispositivos diseñados para convertir la señal eléctrica. Por el material de construcción existen dos tipos muy comunes, basados en:

Silicio, con respuesta en 0.85  $\mu\text{m}$ .

Germanio, con respuesta en 1.3 y 1.5  $\mu\text{m}$ .

Los fotoreceptores más comunes son los diodos PIN y los APD. Los diodos PIN tienen suficiente velocidad de respuesta y sensibilidad adecuada para aplicaciones en redes locales, de relativa baja velocidad (cientos de Mhz). Los APD son significativamente más rápidos y sensibles, ya que operan por un efecto de avalancha, creando un mecanismo multiplicativo. Estos APD son por tanto de gran utilidad en sistemas de larga distancia, con altas velocidades de transmisión.

#### 1. Receptores, Cuadro Comparativo.

	PIN	APD
Eficiencia cuántica	0.6	
Sensibilidad	0.5 A/W	5 a 80 A/W
Factor de multiplicación	---	10 a 100 A/W
Voltaje de polarización		
Silicio	10 a 15 V	200 V
Germanio	10 V	10 a 15 V
InGaAs	10 V	15 a 20 V
Corriente de oscuridad	0.2 nA	5 nA
Temperatura de operación	0 a 70 °C	0 a 70 °C
Ruido dominante	térmico	térmico cuántico

## CAPITULO "3"

### APLICACION DE FIBRAS OPTICAS EN LA INDUSTRIA ELECTRICA

A continuación, se describirán dos sistemas: El primero de ellos analógico donde se puede utilizar parte del equipo ya instalado y el otro digital dando paso a la tecnología del futuro:

#### SISTEMA ANALOGICO

##### UN SISTEMA ANALOGICO DE FIBRA OPTICA PARA USO EN EMPRESAS DE ENERGIA ELECTRICA

Las empresas dedicadas al suministro de electricidad utilizan para la transmisión de mensajes las ventajas que ofrece la técnica de frecuencia portadora. Los sistemas más frecuentemente empleados son los equipos de frecuencia portadora Z12 y Z60, en los que se trata de sistemas bifilares para 12 y 60 canales telefónicos. Como nuevo medio de transmisión se añade ahora a las versiones de cables con hilos de cobre hasta aquí utilizados también la fibra óptica, que es completamente insensible a campos interferentes. Por ello no hay tampoco difonía entre líneas en paralelo. Otras ventajas son su escaso peso y alta flexibilidad, de suerte que esta clase de cables puede ser tendido sobre mástiles preexistentes, sin que estos mástiles tengan que ser reforzados. Evitando las desventajas de línea de cobre, como distorsión de atenuación y distorsiones por efectos de temperatura en ese caso. Los circuitos eléctricos del sistema aquí expuestos están dimensionados de tal manera, que la acreditada concepción



de los equipos de la técnica analógica pueda ser mantenida sin modificaciones.

#### CONCEPTO DEL SISTEMA

Es cierto que los sistemas de fibra óptica están preferentemente diseñados para la transmisión de señales digitales.

En la transmisión de señales analógicas, la intensidad luminica de la fuente óptica se puede controlar con la señal de frecuencia portadora (modulación en intensidad). Pero, como consecuencia de las distorsiones no lineales este servicio dista mucho de cumplir las existencias que se plantean sobre una transmisión por onda portadora. Para evitar grandes perturbaciones no lineales se utiliza la modulación angular; la señal a ser transmitida modula la frecuencia de una portadora; a continuación, esta señal modula la intensidad de haz lumínico emitido, en el transductor electroóptico. En esta técnica, las no linealidades y fuentes de ruido del sistema óptoelectrónico son eliminadas básicamente por un ensanchamiento del rango de frecuencias a transmitirse.

Como transductores electroópticos se emplean diodos luminiscentes que emiten luz cuando se les aplica una tensión polarizada en dirección de paso. La longitud de onda del máximo de radiación es dependiente del tipo de material semiconductor utilizado para el diodo. Con un diodo luminiscente simple se puede acoplar potencias de 2 a 8 MW. Por causa de las diferentes potencias lumínicas, el diodo luminiscente simple sólo es utilizable para cortas distancias. Para alcances mayores se emplea el diodo -

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

Burrus; otros valores aquí indicados fueron determinados con este diodo.

Como transductores optoelectrónicos se utilizan fotodiodos de silicio - con efecto de avalancha o sin él. Para atenuaciones luminicas no muy - grandes, es decir, para tramos de transmisión más bien cortos, es sufi- ciente el diodo PIN simple. En cambio, para tramos más largos hay que em- plear el diodo de avalancha, en el cual la potencia de entrada necesaria- es unos 10 dB menor que en los diodos de PIN. La desventaja de los - diodos de avalancha en el presente contexto reside en la alta tensión de servicio de aproximadamente 150 a 300 V y en la dependencia que en la am- plificación exhibe con respecto a la temperatura. A ellos se añade que - el circuito amplificador debe ser dimensionado extremadamente pobre en - ruido.

En los circuitos descritos a continuación para ambas direcciones de- transmisión, la potencia de recepción óptica mínima está situada en apro- ximadamente 10 nW. De acuerdo con el tipo de fibra utilizado puede sobre- puentearse atenuaciones por salto de alrededor de 35 dB. Hay que conside- rar además todavía, algunos decibels por empalmes, envejecimiento, etc.- Por ejemplo, con una fibra de 3 dB, y transmitiendo 24 canales telefóni- cos, se pueden sobrepuentear hasta 9 km, sin amplificador intermedio. Pa- ra bandas más anchas, por ejemplo para 120 canales de voz, el alcance se- reduce por cuanto que, por una parte, se exige una reserva de modulación- más alta y, por otra, aumenta el ancho de banda de 100 a 550 kHz, eleván- dose el ruido básico a medida que se eleva la frecuencia.

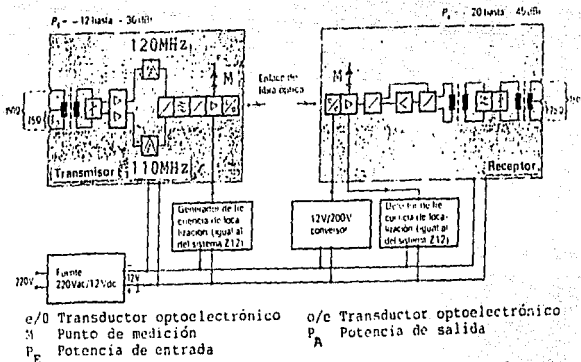


Fig 1. Circuito general de un sistema de fibra óptica para la transmisión de señales analógicas para los sistemas de ondas portadoras de 12,24,60,72,120 y 132 canales.

#### EQUIPO TERMINAL DE LINEA

En la fig. 1 Se muestra el circuito general correspondiente a una terminal de línea. El transmisor tiene a la entrada un transformador cuyo propósito es proveer la adaptación sobre los valores de impedancia usuales en los sistemas de frecuencia portadora, o sea 75 y 150 ohms: el atenuador que viene a continuación sirve asimismo para la adaptación a los diversos niveles de frecuencia portadora. Sigue un amplificador de portafase, una de cuyas salidas desintoniza por medio de un diodo varactor uno de los generadores de acuerdo con la frecuencia portadora. La otra salida controla el segundo generador asimismo por medio de un diodo varactor. Las salidas de los generadores están enlazadas con las entradas del modulador.

A la salida el modulador emite la señal modulada en frecuencia, cuya frecuencia central está situada en aproximadamente 10 Mhz; el filtro que viene a continuación suprime productos de modulación no deseados. Luego viene un limitador que empuja los flancos de la señal modulada en frecuen

cia. Postconectado al limitador está un amplificador que hace pasar la corriente por el transductor electroóptico.

El receptor recibe la señal óptica por medio del transductor optoelectrico y, obtenida la señal eléctrica, la transmite sobre el amplificador de recepción. Sigue un limitador que por medio de una salida aporta señal directamente al demodulador. La segunda salida es transferida por medio de un órgano retardador sobre el demodulador. El pasabajos siguiente filtra la banda útil. Los demás circuitos sirven para la adaptación de impedancias a los diversos sistemas de frecuencia portadora.

Una estación terminal contiene además los circuitos del convertidor de tensión 12 V/200 V para la polarización del diodo de avalancha; en caso de emplearse el diodo PIN, no hace falta esta parte circuital. En la mayoría de las aplicaciones se contará con una tensión de alimentación proveniente de los equipos de onda portadora, de suerte que no será precisa una fuente de alimentación propia.

Por la fig. 1 se deduce, asimismo, que en el sistema pueden emplearse los así llamados dispositivos de frecuencia de localización usuales en la técnica de frecuencia portadora, dispositivos que son de importancia en particular cuando un tramo prolongado está construido sobre varios amplificadores intermedios. No sólo el tramo puede ser entonces constantemente supervisado, sino también la conversión electroóptica de la señal en la estación terminal.

En la estación terminal hay también puntos de medición para la deli-

mitación de fallas, con cuyo auxilio pueden medirse sobre el transmisor y sobre el receptor la señal modulada en frecuencia y también las frecuencias de localización.

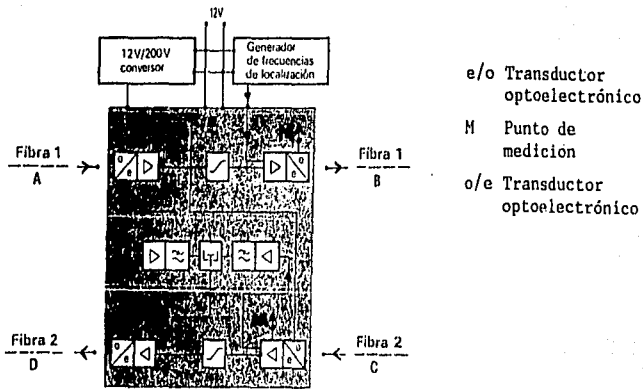


Fig. 2 Circuito general para un amplificador intermedio

#### AMPLIFICADOR INTERMEDIO

En fig. 2 se muestra el circuito general correspondiente a un amplificador intermedio. La vía principal recorre los siguientes circuitos:-- la señal luminica proveniente de la fibra 1 llega a un diodo receptor en avalancha que convierte la señal óptica en eléctrica. Sigue un amplificador de dos etapas que aporta la señal por medio de un limitador al amplificador de transmisión y, luego, a un diodo transmisor de Burrus. La vía en dirección contraria por la fibra 2 sigue un curso análogo. Lo peculiar en este circuito estriba en que sólo es amplificada la señal eléctrica en el rango de la modulación en frecuencia; no aparece aqui la señal de onda portadora en su posición original.

Este principio tiene considerables ventajas: no sólo se ahorran los circuitos del modulador, sino que también se reduce la absorción de potencia desde la fuente de alimentación de 12V. Además no se producen distorsiones en la atenuación, es decir, cuando existen varios puestos de amplificación intermedios no hay adición de las distorsiones, como es usual en la técnica de transmisión alámbrica. Se suman únicamente los factores de ruido.

Además, los circuitos están diseñados de tal manera que ambos transductores optoelectrónicos puedan trabajar con un convertidor de tensión común. En el amplificador intermedio se utilizará siempre un diodo de avalancha como transductor optoeléctrico y un diodo Burrus como transductor electroóptico, para sobrepuntear distancias lo más grande posible.

Un problema especial es el tipo de alimentación de los amplificadores intermedios. Todos los circuitos fueron dimensionados de manera de minimizar la absorción de potencia, un amplificador intermedio completo sólo necesita unos 4W. Con esta pequeña absorción de potencia es posible emplear una fuente de alimentación por energía solar con batería tampón adecuada incluso en latitudes europeas, cuando sobre el emplazamiento de uso no hay tensión de red disponible.

#### DISPOSITIVOS DE FRECUENCIA DE LOCALIZACION

En técnica de transmisión alámbrica es usual que los amplificadores intermedios sean supervisados remotamente. El principio de estos dispositivos de localización fue adoptado también para el sistema de fibra óptica

ca. Particularmente se tomó aquí en cuenta que algunos de los dispositivos de localización existentes en los sistemas de baja capacidad Z12 y Z60 pudieran emplearse sin modificación.

A cada amplificador intermedio y también a cada uno de los equipos terminales de líneas transmisores se le asigna una determinada frecuencia de localización que, como en los sistemas Z12 y Z60, está situada por las correspondientes bandas de onda portadora. Para una banda de transmisión de 6 a 108 kHz se encuentran, escalonados en 3 kHz entre 117 y 147 kHz; para la banda de transmisión de 12 a 552 kHz en el rango de 597 a 627 kHz. En consecuencia, desde un equipo terminal de línea se pueden supervisar remotamente 9 amplificadores intermedios.

En la fig. 2 está reproducido el itinerario de las frecuencias de localización en un amplificador intermedio. Sobre la entrada A la señal lumínica llega al transductor optoeléctrico. En el amplificador de recepción, la señal modulada en frecuencia y también la señal de localización son amplificadas en posición original.

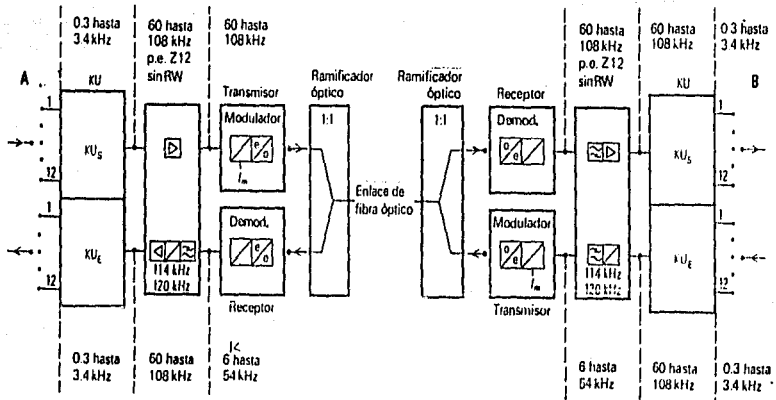
Una salida del amplificador conduce a ambas señales sobre el limitador, que, sin embargo, deja pasar sólo a la señal modulada en frecuencia y suprime la señal de localización. La otra salida conduce sobre un amplificador y sobre un pasabajos, que sólo deja pasar la frecuencia de localización. Esta es aportada luego por medio de un circuito híbrido al transmisor de la dirección contraria y realimentada sobre el equipo terminal de línea juntamente con la señal modulada en frecuencia de la dirección contraria por medio de la salida D.





## SERVICIO BIFILAR A TRAVES DE UNA SOLA FIBRA OPTICA

Como ya se ha mencionado, para cada dirección de transmisión se necesita una fibra. Pero el sistema ofrece también la posibilidad de arreglarse con una sola fibra para dirección de ida y vuelta. Este modo de servicio es realizable con ayuda de un ramificador óptico. [3].



$f_o$  Transductor optoelectrónico  
 $f_m$  Frecuencia de modulación

$KU_2$  Demodulador de canal  
 $KU_3$  Modulador de canal

$o/e$  Transductor optoelectrónico  
 RW Filtro direccional

Fig.4 Transmisión de señales de onda portadora a través de una única fibra óptica

En la fig. 4 esta representado el circuito esquemático de un sistema de este tipo. Un traductor de canal de la técnica de ondas portadoras - en el puesto terminal A provee sobre su salida de transmisión un grupo -- primario básico con el rango de frecuencia de 60 a 108 kHz, que es transferido a un sistema Z12 algo modificado, que no contiene el filtro direccional. La banda del grupo primario llega en la posición original directamente a la entrada del sistema de fibra óptica hasta aquí descrito. El transductor electroóptico del transmisor está enlazado ahora por medio de un ramificador óptico con la fibra. En el puesto terminal B, la señal lu mínica llega al comienzo asimismo nuevamente a un ramificador óptico y, - sólo después, lo hace al transductor optoeléctrico. La parte de recep -- ción del sistema de fibra óptica la emite nuevamente en la posición de grupo primario básico sobre el dispositivo Z12 y, luego, sobre la parte - de recepción del traductor de canal.

En la dirección contraria la transmisión se efectúa en forma análoga sólo que aquí, en el puesto terminal B, la banda de grupo básico primario proveniente del convertidor de canal es convertida, en el dispositivo Z12 en la posición de frecuencia 6 a 54 kHz, antes de ser entregada sobre los circuitos de fibra óptica. En el puesto terminal A, el dispositivo Z12 - repone la banda de frecuencia de 6 a 54 kHz en la posición de grupo prima rio básico.

#### CONSIDERACION FINAL

Con el sistema de fibra óptica aquí expuesto es posible operar tam -

bién sistemas de frecuencia portadora por el nuevo medio de transmisión -- con buena calidad, siendo particularmente dignas de tomarse en cuenta las ventajas que ofrece la aplicación en empresas de energía eléctrica. Pues una transmisión de mensajes por medios alámbricos exige una erogación con siderable en componentes y circuitos eléctricos para neutralizar sobre todo las influencias que sobre la transmisión por ondas portadoras ejercen - campos electromagnéticos interferentes (por ejemplo por fulminación o cortocircuito en las líneas energéticas). A ello se agrega que en esta técnica debe exactamente corregirse la atenuación de la línea, específica de ca da tipo de cable; también debe suprimirse, mediante correctores especiales la influencia de la temperatura sobre la atenuación del cable.

#### SISTEMA DIGITAL

Un sistema de fibra óptica para una transmisión de canal múltiple está ilustrado en la fig. 1. El sistema está compuesto de una parte eléctrica y una parte óptica. Al final del transmisor, un multiplexor electrónico combina varios canales para formar una señal multiplexada. Un codificador convierte esta señal múltiple dentro de un formato adecuado para la transmisión óptica. El convertidor electroóptico finalmente genera una se ñal de luz correspondiente a la señal eléctrica codificada.

Las ondas de luz son propagadas dentro del cable de fibra óptica al final del receptor y entran en el convertidor optoeléctrico en forma atenuada. El convertidor transforma nuevamente a la señal óptica a una corriente eléctrica proporcional, después de amplificarse la señal eléctrica pue-

de ser decodificada y finalmente abierta entre varios canales para demultiplexarse.

El sistema de multiplexaje por división de frecuencia es usado ampliamente por los sistemas de enlace convencional de compañías poderosas. En este sistema los canales individuales análogos son colocados lado por lado de acuerdo a la frecuencia modulada en el multiplexaje.

Este procedimiento ahorra ancho de banda, especialmente cuando se transmiten señales de discurso. Aunque una señal multiplexada de este tipo puede ser transmitida ópticamente, un procedimiento de multiplexaje diferente es preferido para sistemas de fibra óptica; multiplexaje por división de tiempo. En el sistema digital de multiplexaje por división de tiempo, las muestras son tomadas de canales individuales periódicamente y transmitidas en forma digital durante una secuencia de tiempo. Una palabra sincronizadora al principio muestra cuando cada nuevo ciclo empieza. Esto es requerido en el receptor para asegurar un demultiplexaje correcto. Señales análogas (ejemplo en telefonía) pueden ser digitalizadas por convertidores analógicos a digital ya sea antes o después del multiplexaje. El incremento en el ancho necesitado para el convertidor A/D y el código binario para telefonía con modulación de pulsos codificados (PCM), por ejemplo, por un factor de ocho tiene poco o ninguna importancia para las transmisiones ópticas porque el cable de fibra óptica tiene un ancho de banda grande. Las señales digitales pueden ser regeneradas en repetidores y consecuentemente, pueden ser transmitidas por varias secciones de repetidores sin deteriorización importante en cuanto a la calidad.

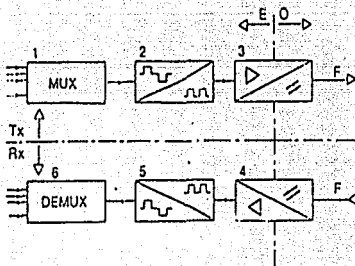


Fig. 1. Principio de un enlace de comunicación multicanal óptico.

- |                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| E = Parte eléctrica    | 2 = Convertidor de código        |
| O = Parte óptica       | 3 = Convertidor electro-óptico   |
| F = Fibra óptica       | 4 = Convertidor opto-electrónico |
| Tx = Parte transmisora | 5 = Decodificador                |
| Rx = Parte receptora   | 6 = Demultiplexor                |
| 1 = Multiplexor        |                                  |

#### CONVERTIDOR ELECTRO-ÓPTICO

Para transmitir por fibras ópticas, dos tipos de transmisores ópticos son utilizados; El diodo de emisión de luz (LED) y el diodo laser semiconductor (LD). Ambos son usados actualmente para emitir longitudes de onda en la región de 850 y 1300 nm.

Con el LD la potencia de la luz es de 10 a 20 dB más fuerte que con un LED que puede ser acoplado dentro de una tableta graduada entre 50/125- $\mu$ m. En contraste la vida útil del laser es más corta y es menos confiable que el LED. Para enlaces de larga distancia un diodo laser de 1300 nm es-

el más adecuado elemento, porque permite máximas distancias entre repetidores.

#### CONVERTIDOR OPTO-ELECTRONICO

Para circuitos receptores ópticos 2 variables han probado su valía ; El primero emplea un diodo PIN como fotoconductor, seguido por un pre-amplificador FET de bajo ruido y de baja capacitancia. Esta configuración es frecuentemente llamada como receptor PIN-FET.

La segunda variable emplea un fotodiodo avalancha (APD) como fotodetector.

#### SISTEMAS Y APLICACIONES

El campo de suministro de aplicaciones potenciales para enlaces de fibras ópticas son:

- a) Enlaces expuestos a varios disturbios electromagnéticos o altas diferencias entre potenciales de tierra. (como resultado de fallas en la línea de potencia).

Ejemplos: Son los enlaces transmisores de datos y señales de protección del sitio de cambio al cuarto de control de la estación.

- b) Enlaces donde, debido a la falta de espacio o a la minimización del costo del transporte de energía y el flujo de información tienen que emplear la misma ruta.
- c) Enlaces de alimentación a través de áreas urbanas donde edificios de

multialmacenamiento impiden las comunicaciones de radio y la capacidad de los canales de los enlaces portadores en cables de cobre no es suficiente.

- d) Enlaces de larga distancia con una capacidad alta del canal en donde las frecuencias de micro-ondas no son aprovechables.
- e) Enlaces existentes los cuáles tienen que ser duplicados para una segunda ruta.

Para ciertas aplicaciones en el suministro de energía, distancias cortas de transmisión (<5 km) y pequeños números de canales son típicos. En tales casos es la propiedad dieléctrica de la fibra óptica la que recibe la mayor consideración. Los otros casos demandan un gran número de canales (10 a 120 canales) y equipo óptico de alta potencia, los cuáles en el presente permiten que las distancias entre repetidores sean tan largas como se puedan.

Estas condiciones limitantes imponen diferentes requerimientos en el equipo terminal. Una solución con óptimos costos puede ser solamente encontrada en dos diferentes combinaciones de equipo.

Una solución favorable es en cuanto a precio para transmisión óptica de más de seis datos o canales de protecciones sobre una distancia hasta de 5 kilómetros.

La unidad básica se compone del multiplexor/demultiplexor, del codificador/decodificador óptico, la unidad de tiempo, con sincronizador y circuitos de monitores y el transmisor óptico puede ser alimentado con varias in

terfases como sean requeridas.

- Interfase de datos para la transmisión de datos asíncronos con rangos entre 50 y 2400 bauds (telecontrol de datos).
- Interfase de protección para la transmisión de comandos de protección (línea o objetos de protección).
- Interfases análogas para la transmisión de un canal de telefonía.

La transmisión de comandos de protección impone especiales demandas en el equipo terminal. Señales de protección difieren de datos ordinarios por virtud de su pronunciada asimetría. Normalmente el canal está en un estado de reposo ("0") y sólo rara vez transmite comandos de envío ("1"). En el estado de reposo el equipo terminal tiene que satisfacer las fuertes demandas de seguridad con respecto a un falso envío y el estado operativo debe asegurar la necesaria confiabilidad con respecto a la pérdida de comandos asociados con rápida respuesta. En este punto podría ser que aún con enlaces de fibra óptica que son fuertemente descritos como casi-infalibles o imperturbables, las condiciones arriba mencionadas todavía se aplican sin restricción. Casualmente los disturbios o fallas en el mecanismo pueden diferir de eso, de los sistemas análogos convencionales.

- Las funciones de canales de protección son verificadas automáticamente por una fácil auto-prueba que opera en intervalos regulares.
- La estructura especial de la señal multiplexada casi excluye el riesgo de falsa sincronización o errores de identidad de los seis cana -



les cuando demultiplexamos.

- Evaluación continua de bit error que verifica la calidad de la transmisión.
- Un indicador de error de paridad en la transmisión o en el circuito eléctrico.

Cuando una falla es reconocida las salidas son bloqueadas.

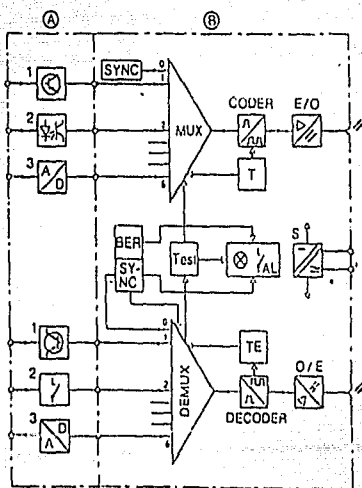


Fig. 2

Diagrama de bloques.

Del diagrama de bloques tenemos que:

A = Interfases opcionales

- 1 = Interfase de datos
  - 2 = Interfase de protección
  - 3 - Interfase análoga
- Ejemplo: Para telefonía

B = Equipo Básico

- Mux = Multiplexor
- E/O = Transmisor óptico
- O/E = Receptor óptico
- TE = Reloj de extracción
- DEMUX = Demultiplexor
- SYNC = Circuito sincronizador
- BER = Supervisión del rango del bit de error
- TEST = Facilidad para periódicamente auto-probar los canales de protección.
- AL = Unidad de alarma
- T = Suministro de tiempo reloj
- S = Fuente de poder

#### RUTA DE TRANSMISION

Enlaces de largas distancias de Multicanales son en nuestros días usados por compañías poderosas como enlaces portadores. Aparte del equipo terminal es de particular importancia fijar la ruta de transmisión. Excelentes resultados han sido obtenidos con una ruta de comunicación integrada en la base del enlace de líneas de alto voltaje.

Es un paso obvio a utilizar el mismo método para transmisión óptica para cables de fibra óptica. La operación de enlaces de fibra óptica pa-

ra telecomunicaciones ha sido integrada en los enlaces de líneas de potencia de alto voltaje.

## CAPITULO "4"

### APLICACION DE FIBRA OPTICA

Si resumimos las principales ventajas de las F.O. tenemos que son:

- Ligeras y Compactas
- Muy bajas pérdidas (Baja Atenuación)
- Gran capacidad de información
- Libres de interferencias eléctricas, como las interferencias electromagnéticas o de radio frecuencia.
- Poca posibilidad de interceptación
- Alta velocidad de transmisión

Podemos entonces apreciar el resumen del vasto panorama de sus aplicaciones.

Telefonía: Troncal, local, larga distancia.

T.V. : Blanco/negro, color circuito cerrado, por cable.

Señalización y telecontrol en zonas de alta interferencia interconexión de computadoras y sus terminales, bajada y distribución de antenas parabólicas.

- Cables de fibras ópticas
- Sensores de fibras ópticas

Pero analicemos más a fondo alguna de las diversas aplicaciones.

- - - - -

## ENLACES

### a) Urbanos

Las redes de enlaces urbanos, tienen una separación media que oscila entre 3 y 9  $\mu$ m. Utilizando FO, esta distancia puede cubrirse con sistemas de transmisión en 850 nm, a velocidades de 34 Mb/s y 140 Mb/s. En algunos casos se presentan distancias entre 15 y 20 Km. En tales situaciones y con el fin de evitar repetidores intermedios se trabaja a longitudes de onda de 1300nm, prefiriéndose velocidades de 140 Mb/s.

### b) Interurbanos Terrestres.

Esta red es la que une centrales secundarias o terciarias, ubicadas en diferentes regiones o provincias. Las distancias varían entre 50 y 500 Km, y en algunos casos hasta 1000 Km (enlace de telecomunicaciones entre ciudades importantes).

La máxima distancia entre repetidores depende sensiblemente de la longitud de onda de trabajo y del tipo de fibra. Pero en general, para fibras multimodales y monomodales, es notablemente superior a la alcanzable con sistemas coaxiales de capacidad similar. En la Tabla se da una idea de las distancias máximas alcanzables, y del tipo de fibra recomendable.

## APLICACION EN TELEFONIA

Típicamente una llamada que se inicia en el aparato telefónico, se propaga en conductores de cobre llegando al edificio de la central telefónica.

nica. Aquí automáticamente se selecciona la ruta a seguir, escogiendo las otras centrales por las cuáles pasará hasta llegar a su destino final.

Para hacer más eficiente el uso de los canales, se han desarrollado equipos electrónicos que unen varios canales telefónicos sin alterarlos - entre sí. Estos sistemas utilizan las técnicas digitales de modulación - por impulsos codificados (MIC), que internacionalmente son conocidos como sistemas PCM de las siglas en inglés para "Pulse Code Modulation".

La voz genera tonos desde 300 hz, donde hz = hertz = ciclo/segundo.- Se ha estandarizado que un canal telefónico sea de 4,000 hz = 4 Khz, a lo que nos referimos como su ancho de banda. Para modular un canal telefónico y sumarlos con otros, se requiere el doble de ancho de banda. Esto hace que para cada orden de PCM se requiera a su vez un mayor ancho de -- banda. Sin embargo, los pares de cobre no pueden satisfacer este requisito sino solamente para los sistemas de primer orden. Es aquí en donde las fibras ópticas encuentran una de las más importantes aplicaciones, la - transmisión de sistemas PCM de órdenes mayores, a través de un solo filamento.

Anteriormente se hizo una rápida descripción del origen de una llamada telefónica y su llegada a la central telefónica, donde se enruta y por un procesado electrónico, la llamada se envía junto con otras hacia otra central. Este reunido de señales individuales se conoce como procesamiento multiplex, del cuál se deriva la señal que se entrega a la fuente luminosa conectada a la fibra óptica. Similarmente, la señal recibida en el extremo detector se de-multiplexa para separar los canales telefónicos

individuales que se envían independientemente a cada teléfono receptor.

La interconexión de las centrales telefónicas es apenas el inicio de las aplicaciones de las fibras ópticas. Hoy día se tienen en la fase experimental el llegar hasta el abonado mismo, hasta su "teléfono particular", con una F.O. resaltamos la palabra teléfono para poner en relieve que esa ya no sería propiamente un aparato sino un conjunto de equipos de comunicación y podemos tener el anhelado videoteléfono.

#### SISTEMAS DIGITALES MIC EN F.O.

ORDEN	VELOCIDAD	CANALES	LONG. DE ONDA	FIBRA	FUENTE
1	2 Mb/s	30	850 NM	MM	LED
2	8 Mb/s	120	850 NM	MM	LED
3	34 Mb/s	480	850 NM	MM	LED
			1 300 NM	MM,UM	LED, LD
4	140 Mb/s	1 920	1 300 NM	UM	LD
			1 550 NM	UM	LD
5	560 Mb/s	7 680	1 300 NM	UM	LD
			1 550 NM	UM	LD

#### REDES LOCALES (LAN)

Hasta comienzos de los ochenta, la fibra óptica no se consideraba idónea para redes locales, básicamente por la relación de costo frente a los conductores metálicos. Por ello sólo se justificaba para aplicaciones de larga distancia, altas velocidades de transmisión, y zonas de altas interferencias electromagnéticas, ruido, etc. Pero gracias a los avances en los componentes electrónicos y en los sistemas, se ha hecho cambiar la situa -

ción anterior.

Una red de área local (LAN), es un sistema que permite la intercomunicación de un conjunto de terminales, unos con otros. Estas redes operan en un ancho de banda que oscila entre 10 y 20 Mb/s normalmente. Su aplicación esta básicamente en edificios de oficinas, campos universitarios, comercios y negocios.

#### SISTEMAS DE COMUNICACION INDUSTRIAL

En fábricas y plantas de generación eléctrica, es frecuente que los sistemas de comunicación operan con redes instaladas en paralelo a las líneas de transmisión de potencia. Es así que las fibras ópticas entran como una solución idónea. La selección óptima son las redes LAN, aún cuando son más común, hoy día, las redes de terminales, sistemas de televigilancia y sistemas supervisorios de control industrial.

#### COMUNICACION POR VIDEO

En la transmisión de señales de video, los sistemas PCM son usados para transmitir a gran distancia. Para relativamente cortas distancias, el enlace se hace a través de la modulación analógica directa del LED.

Los dibujos que se indican a continuación, son algunos ejemplos de enlaces a corta distancia (menores a 10 KM).

Fig. a - Sistema de TV industrial

Fig. b - Sistema de TV para radiodifusión.

Fig. c - Sistema de abonado "telefónico.



Los principales parámetros a observar en estos sistemas, son:

Transmisión en VHF .

Transmisión en banda base 4 MHz

Transmisión de datos 1.5 Mb/s

Multiplexado en longitud de onda de 0,81 a 1.3  $\mu$ m.

Distancia de repetidoras 5 KM.

Fibra óptica 50/125 MM.

Relación señal a ruido 42 dB, o más.

Tasa de bits error par 1.5 Mb/s es de  $1 \times 10^{-6}$ , o mejor

TABLA 1.

Distancia entre repetidores con equipos sobre fibra óptica.

Velocidad Transmisión Mb/s	tipo de Fibra	aplicación (Enlaces)	Distancia de 850 nm	repetición (KM) 1 300 nm (Mb/s)
2.048	Multimodal	Especiales	14-20	20
8.4	Multimodal	Urbanos	10-15	20
34.3	Multimodal	Urbanos	7-12	20
		(Alta calidad)		
139.3	Multimodal	Urbanos	7-10 (MM)	16-20 (MM)
	Unimodal	Interurbanos		30-40 (UM)
560.0	Unimodal	Interurbanos	No se usa	15-20

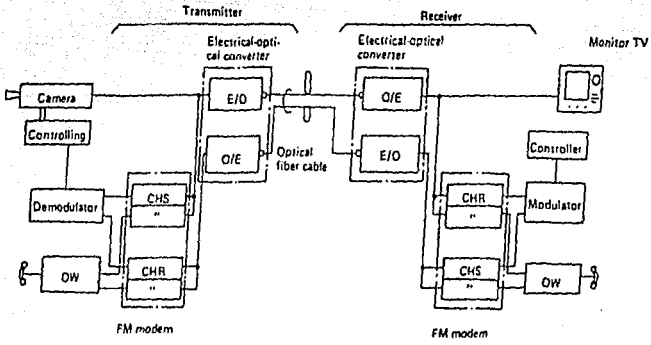


FIG. A

TV field pick-up van (FPU)

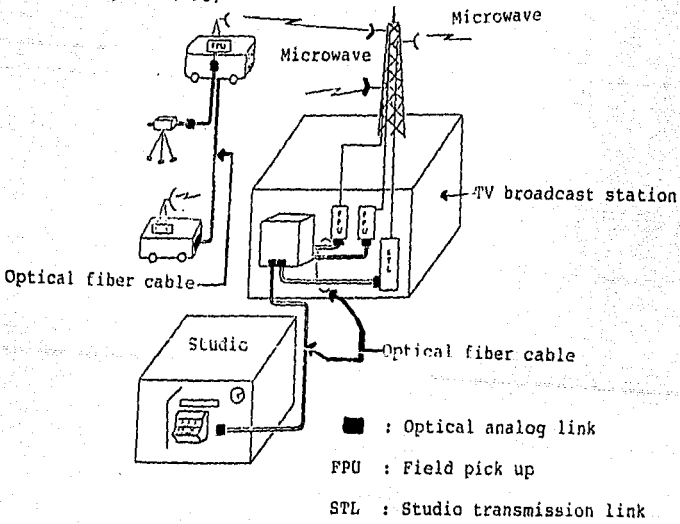


FIG. B

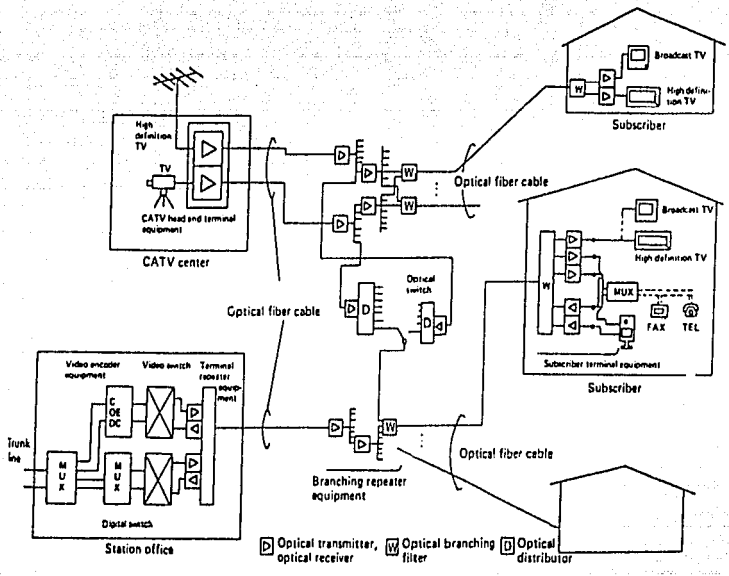


FIG. C

## CABLES DE FIBRAS OPTICAS

Existen varias aplicaciones de las FO en otro tipo de cables, como son los cables de minas, los cables submarinos, los cables aéreos conductores de fase (energía), o el hilo de guarda (OPGW), desde luego que la utilización de fibras ópticas en cables aéreos demanda condiciones de fabricación diferentes de las consideradas en cables multifibra subterráneos. Esto es muy claro, puesto que se verá sometido a esfuerzos mecánicos constantes, acción del viento y de la lluvia, cargas de hielo, etc. Todo ello redundará en una necesaria protección mecánica mayor al núcleo óptico para su integración al cable principal.

Cuando se habla de cables de energía es importante considerar que la utilización de las fibras ópticas normalmente es para aprovechar la disponibilidad del medio, o la vía de comunicación ya existente entre dos puntos. Por lo tanto, su incorporación al cable de energía debe ser tal que en ningún momento se afecten las características eléctricas o mecánicas de operación de uno y otro cables al integrarlos.

Para el caso de cables híbridos de energía, minas, u otras aplicaciones, se construyen los núcleos ópticos considerándolos como un elemento (posición) dentro del cable principal. Son muchas alternativas, por lo cual es necesario considerar caso por caso el diseño y construcción particular. Como recomendación general, debe ponerse especial atención en los esfuerzos mecánicos y térmicos a que será sometido el cable principal. Esos cuidados son previendo que dichos esfuerzos no sean transferidos seve

ramente hacia el núcleo óptico.

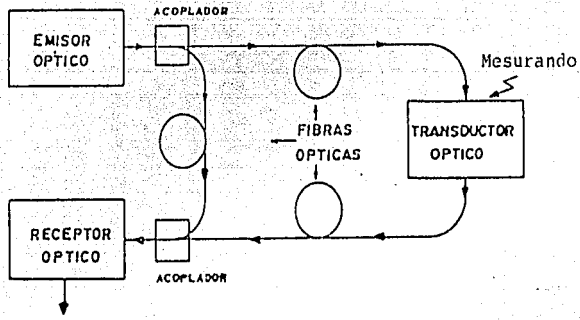
Ya que los enlaces digitales están ampliamente extendidos mediante cables metálicos, la introducción de la fibra óptica en las redes se adapta principalmente a la evolución de las redes totalmente digitales.

#### SENSORES DE FIBRA OPTICA

Las fibras ópticas, cuya aplicación principal se encuentra en el campo de las telecomunicaciones, presentan, además, características adecuadas para la utilización en la transducción de variables físicas.

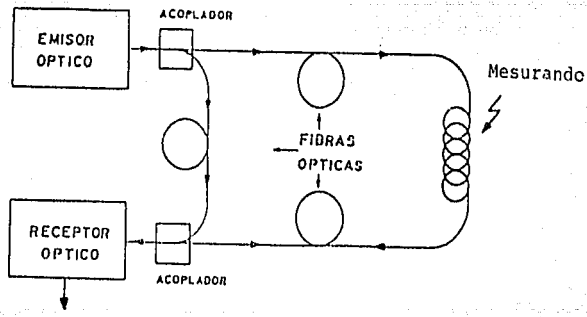
En efecto, el mesurando, al interactuar con el campo óptico que se propaga en la fibra o en un elemento transductor externo, afecta a alguna de sus propiedades tales como la amplitud, la fase, la frecuencia, la polarización o la dirección de propagación. La radiación luminosa modificada es detectada y procesada, obteniéndose una función del mesurando.

Usadas como sensores, las fibras presentan ventajas interesantes, entre las que pueden citarse; sensibilidad a gran cantidad de mesurandos; alta sensibilidad, gran ancho de banda posibilidad de mediciones con Integración de línea; posibilidad de mediciones distribuidas; y baja atenuación de la luz con la propagación. Además el medio de medición es eléctricamente pasivo y fácilmente interconectable con enlaces de comunicaciones ópticas.



f) Mesurando

FIG. D DE SENSOR EXTRINSECO



f) Mesurando

FIG. E SENSOR INTRINSECO

## SENSORES BASADOS EN LA MODIFICACION DE LA INTENSIDAD LUMINOSA

En esta categoría de sensores, el mesurando afecta la intensidad de la luz que se propaga en la fibra o en un transductor externo. Las figuras D, y E, ilustran el esquema utilizado; en este caso no se utiliza la referencia óptica proporcionada por los acopladores; se usan en general fibras ópticas multimodales.

Existen sensores de diferentes variables; por ejemplo; sensores de desplazamiento basados en cambios en la transmisividad de la luz entre dos fibras a causa del movimiento de una pantalla opaca o de una red de difracción situada entre ellas; sensores basados en variaciones en la potencia luminosa reflejada por el elemento cuyo desplazamiento se desea medir, utilizando ondas no planas; transductores de presión basados en variaciones de la potencia transmitida al modificarse las condiciones de reflexión total interna en la fibra al estar sometida a esfuerzos; sensores de concentración de gases, de detección de contaminantes, o de PH, utilizando la absorción espectral del elemento analizado; sensores de temperatura emplean la fotoluminescencia de un material situado en el extremo de la fibra; sensores de radiación nuclear usando la atenuación suplementaria producida por aquélla sobre la fibra.

La ventaja de este tipo de sensores es que requieren componentes relativamente simples y el procesamiento de la señal electrónica resultante es sencillo; sin embargo, son sensibles a variaciones de intensidad causadas por deformaciones en la fibra, fluctuaciones en la potencia óptica enviada y en las condiciones de acoplamiento.

## SENSORES BASADOS EN LA MODIFICACION DE FASE DEL CAMPO OPTICO.

La operación de este tipo de sensores se basa en la detección de variaciones de fase causadas por cambios en la longitud de trayectoria óptica por acción del mesurando, a través de diversos fenómenos, tales como - elastoóptico, electroóptico (Pockels, Kerr), magnetoóptico, (Faraday), Doppler, Sagnac.

Este tipo de sensores requiere de un montaje interferométrico que es en general, de tipo Mach-Zhender, con fibras ópticas unimodales, como se muestra en las figuras d y e, en las que el haz de referencia del interferómetro se deriva con acopladores ópticos.

La naturaleza unidimensional de la fibra óptica permite grandes longitudes de trayectoria de integración entre la luz y el mesurando, de modo que la acción de la variable medida es integrada a lo largo de la fibra siguiendo la geometría deseada. Esto constituye una ventaja debido a la gran sensibilidad obtenida al integrar el efecto sobre una trayectoria larga; además, en otros casos, la cantidad requerida es la integral.

En el primer caso se tienen, por ejemplo, los hidrófonos y los giróscopos; en el último caso, los sensores de corriente (como integral de línea del campo magnético) y de voltaje (integral de línea del campo eléctrico).

Estos sistemas presentan gran sensibilidad y rango dinámico; sin embargo, requieren fuentes ópticas de bajo ruido y frecuentemente, fibras con control de polarización y con piezoeléctrico; además, son sensibles a otras variables tales como temperatura y vibración. El procesamiento de



la señal detectada es, en muchos casos, complicado.

#### SENSORES DE VARIABLES DISTRIBUIDAS.

La determinación del valor de una variable en función de la posición a lo largo de una fibra óptica puede realizarse de manera discreta o continua. En el primer caso la medición se realiza en puntos o secciones de la fibra; los transductores puede estar constituidos por fibras como parte integral de la fibra principal, o por elementos externos, con las fibras únicamente como elementos de conexión, como se ilustra en la figura F.

En los sistemas distribuidos continuos, la manera habitual de identificar las diferentes posiciones a lo largo de la fibra es utilizando los diferentes tiempos de propagación de la luz desde el extremo emisor. Esto puede hacerse en el dominio del tiempo, midiendo tiempos de propagación de un pulso óptico, como se ilustra en la figura G o en el dominio de la frecuencia, usando técnicas de modulación de la frecuencia óptica.

Los sensores de fibras ópticas ofrecen posibilidades muy interesantes en la transducción de variables físicas. Sin embargo, quedan por resolver problemas fundamentales en su operación. Actualmente, se realiza investigación de diversos aspectos; nuevos fenómenos utilizables en la medición de variables, esquemas interferométricos compensados, sensores de variables distribuidas, esquemas con multicanalización recubrimientos en las fibras, fibras con polarización controlada, componentes y subsistemas en óptica integrada.

A nivel industrial, actualmente se encuentran en operación sensores de tipo incoherente en el área eléctrica, química, médica y navegación. Los de tipo interferométrico aún no se encuentran a este nivel de utilización, exceptuando algunas aplicaciones militares y en la navegación.

A pesar de todas las ventajas que ofrecen las fibras ópticas cabe mencionar algunas desventajas.

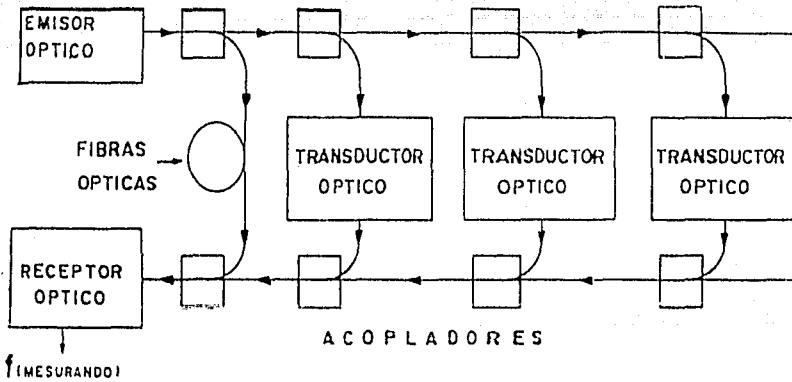


FIG. F SENSOR CUASIDISTRIBUIDO.

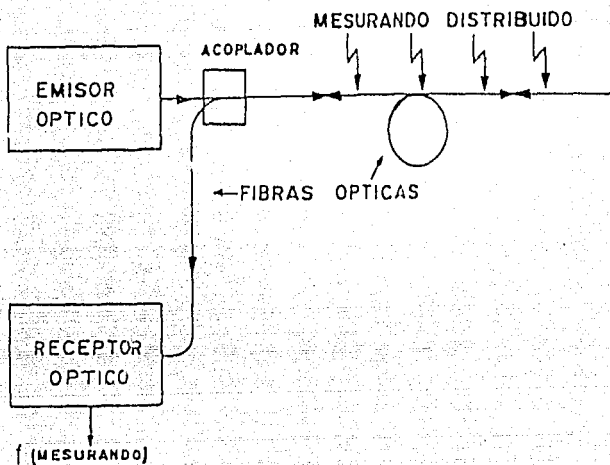


FIG. G SENSOR DISTRIBUIDO.

Las fibras ópticas son muy flexibles pueden romperse si se curvan mucho por eso hay que tener cuidado durante su instalación.

Empalmar cables de fibra óptica es más complicado que empalmar cables de metal.

Por último la tecnología de fibras ópticas es nueva y su introducción es enteramente muy personal puede elevar los costos, pero esto se puede compensar, debido a que los precios en los cables se han reducido notablemente en los últimos años, además que el cable de fibra óptica puede

de colgarse en los mismos postes de línea de energía, etc.

Pero pese a lo anterior podemos concluir que:

La paralela miniaturización continuada de la electrónica nos lleva -  
ría junto con las fibras ópticas a vivir en breve una maravillosa época -  
de notables satisfacciones tecnológicas.

## APENDICE "A"

### SISTEMA DE COMUNICACION

#### - Modulación

La comunicación electrónica, consiste en establecer un enlace de intercambio de información entre dos puntos o más. La información que se transmite y recibe podrá ser de forma unidireccional o bidireccional.

En general, las señales de información, tal como se originan en la fuente, no son adecuadas para su transmisión. Por tal motivo es necesario modificar la señal que contiene la información, de forma que sus características la hagan apropiada para ser enviada por el canal de transmisión seleccionado. A esta modificación de la señal de la información se le llama PROCESO DE MODULACION.

Existen dos razones por las cuáles es necesario el proceso de modulación:

- \* Para la transmisión por radiación.
- \* Para la transmisión de varias señales por un mismo canal (Multiplexación).

Los diferentes métodos de modulación se pueden agrupar en tres tipos:

1. Modulación analógica o continua.
2. Modulación por pulso o discreta.
3. Modulación digital-analógica.

## 1. Modulación analógica.

Se denomina así porque la señal portadora es una señal continua, generalmente una señal senoidal de frecuencia mucho mayor que la de la señal de información.

### a. Modulación en amplitud (AM)

La amplitud de la señal portadora, varía en función de la señal de información. (Ver Fig. 1).

### b. Modulación en fase (PM)

La fase de la señal portadora lleva la información al variar de acuerdo con la señal de información. (Ver Fig. 2).

### c. Modulación en frecuencia (FM)

La derivada de la fase con respecto al tiempo, es el parámetro variable con la señal de información. Prácticamente este se ve como una variación en la frecuencia de la portadora. (Ver. Fig. 3).

## 2. Modulación por pulsos o discreta.

En este tipo de modulación la señal portadora es un tren de pulsos periódico. Existen cuatro clases principales que son:

\* Modulación por amplitud del pulso (PAM)

\* Modulación por posición del pulso (PPM)

\* Modulación por duración del pulso (PDM)

\* Modulación por pulsos codificados (PCM)

Esta última es la más importante de las modulaciones discretas. Es

utilizada para transmitir una señal analógica en forma digital.

La señal continua es muestreada, cuantizada y finalmente codificada.

Fig. 4.

### 3. Modulación digital-analógica.

Es en realidad una combinación de los dos tipos de modulación antes de mencionados. Considerando el caso de una señal PCM que se tiene que radiar, entonces es necesario someterla a un proceso de modulación analógica. Es decir, la señal digital PCM va a modular en amplitud, frecuencia, o fase a una señal senoidal de frecuencia de radio.

Si la señal senoidal es modulada en frecuencia por la señal digital, se tendrá el sistema FSK (Frequency Shift Keying).

Si la señal senoidal es modulada en amplitud por la señal digital, se tendrá el sistema ASK (Amplitude Shift Keying). Cuando la señal senoidal es modulada en fase por la señal digital, el sistema de modulación se conoce como PSK (Phase Shift Keying).

De estos tipos de modulaciones, la más utilizada en sistemas de telecontrol, datos y telefonía es la transmisión digital, por las siguientes razones:

- \* El efecto del ruido como distorsión es menor
- \* Las fuentes de información generalmente son máquinas cuyo lenguaje es digital.
- \* Se maneja un ancho de banda mayor.

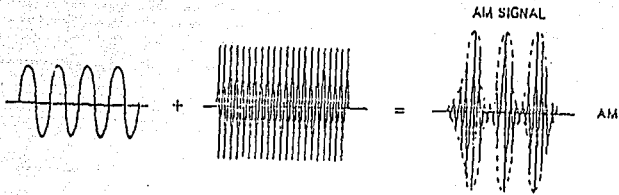


FIG. 1.

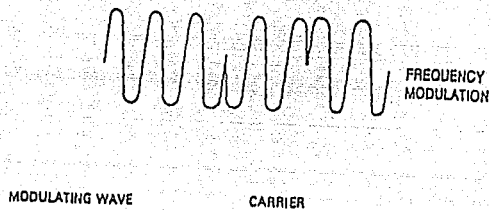


FIG. 2

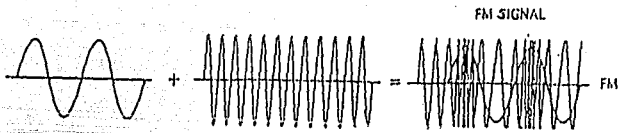


FIG. 3



## APENDICE "B"

### TERMINOS ASOCIADOS A F.O.

- FO Fibra óptica
- MM Multimodal
- SM Single-mode
- UM Uni-modal
- N.A. Numerical Apertura numérica.- Define el cono de aceptación de la luz a la F.O.
- nm Nanómetro =  $10^{-9}$  metro =  $10^{-6}$  mm = 1 millonésima de mm.
- um Micrómetro = (Micron) = micras =  $10^{-6}$  metro = 1 millonésima de metro.
- Bandwidth - ancho de banda - Capacidad de respuesta.
- MFD Mode Field Diameter.- Diámetro del modo de propagación. En la FO-UM la luz viaja dentro del núcleo y además un poco fuera de él. Tal extensión hacia el revestimiento (clad) se caracteriza con este parámetro, medida vía VAMFF.
- LED Light Emitting Diode.- Diodo emisor de la luz.- Dispositivo semiconductor de baja frecuencia, operable hasta 50 MHz.
- LD Laser diode,- Diodo Laser.- dispositivo semiconductor con operación similar al LED, pero con un cono de emisión de luz mucho más angosto y frecuencia de modulación hasta algunos GHz; (Gigahertz =  $10^{+9}$  Hz).
- LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.- Amplificación de luz por emisión estimulada de la radiación.- Técnica de ge-

neración de luz en una cavidad resonante.

**PIN** PIN Diode.- Dispositivo semiconductor con una capa P, una capa N y en medio un semiconductor Intrínseco. Es sensible a la luz y al detectarla genera una corriente eléctrica proporcional, por ello es utilizado como detector.

**APD** Avalanche Photo-Diode.- Fotodiodo de Avalancha.- dispositivo semiconductor, detector de luz, similar al PIN pero con un mayor ancho de banda y mayor eficiencia en la conversión opto-eléctrica. Tal eficiencia se traduce en un mayor factor de ganancia, ó amplificación, con respecto a los diodos PIN.

**---** Fototransistor - dispositivo optoelectrónico mucho más lento (menor ancho de banda) que el PIN.

**S/N** Signal to Noise ratio.- relación señal a ruido cociente de los niveles de potencia, en dB, para evaluar sistemas.

**Modem** Modulador-Demodulador.- Equipo electrónico para transmitir y recibir señales. La señal original se transforma o "modula" según la técnica y medio de transmisión. El modem más comunmente llamado así es para señales de computadora en formato RS-232. La señal de la computadora es modulada adicionando señales de control. El modem eléctrico recibe una señal digital y envía una señal para canal telefónico. El modem óptico prácticamente sólo convierte la señal digital eléctrica en señal digital óptica.

**MUX** Multiplexor o multi-canalizador o multi-canalización.- Técnica de modulación electrónica que permite conjugar varias señales analógicas o digitales para enviarlas por una misma vía de comunicación -

(par telef., micro-onda, FO, etc.). Existe MUX en frecuencia y el más común hoy es el MUX en tiempo. En este último, entre dos bits consecutivos de una señal, se intercala uno o más bits correspondientes a una o más señales que se conjugarán. Esto es la base de PCM.

PCM Pulse Code Modulation.- Modulación por Impulsos Codificados (MIC). Técnica que convierte un canal telefónico (ancho de banda 4 kHz) en una señal digital de 64kbits/s. Esto se debe a que cada canal se muestrea a una velocidad de 8 kHz o sea cada 125 Ms. y cada muestra se codifica en 8 bits. Así  $8 \text{ bit} \times 8 \text{ kHz} = 64 \text{ Kbit/s}$ . Cada trama de PCM consiste de varios canales de voz y algunos canales para alineación o sincronía de trama.

--- Video.- El ancho de banda comercial por TV es 4.2 MHz más una pequeña banda para audio. La separación entre canales comerciales es 6 MHz y esto se puede decir es el ancho de banda práctico.

--- Line code.- Código de línea.- Al modular una señal digital para transmitirla, generalmente se agregan bits para tener una mayor seguridad y poder detectar posibles errores de transmisión. El cambio de código se expresa como 1B2B o 5B6B, expresando que entra un bit y salen dos, o que entran cinco y salen seis. Estos dos casos son los más comunes, pero son posibles varios más nBmB, siendo n < m.

## B I B L I O G R A F I A

1. APUNTES DE LA CLASE: "PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA"  
ING. AUGUSTO O. HINTZE  
FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
2. EL ARTE Y LA CIENCIA DE LA PROTECCION POR RELEVADORES MASON, RUSELL  
ED. CEGSA  
12 ED.
3. REVISTA: BROWN BOVERI REVIEW 5/6  
VOL. 70 (MAY/JUNE 1983).  
BROWN BOVERI  
VARIOS AUTORES  
BADEN/SUIZA
4. COMMUNICATION SYSTEM ENGINEERING HANDBOOK HAMSHER
5. COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS  
FEBRERO 1987  
ERICSSON/LATINCASA
6. REVISTA: COMUNICACIONES OPTICAS, ED. ESPECIAL DE: "TELECOM REPORT"  
VOL. 6 1988  
S I E M E N S  
VARIOS AUTORES
7. CONDUCTORES DE FIBRA OPTICA  
MAHLKE, GUNTHER  
GUSSING, PETER  
S I E M E N S  
ED. MARCOMBO S.A.
8. CONFERENCIA: FIBRAS OPTICAS EN EL CAMPO DE LAS TELECOMUNICACIONES  
1987  
CONSUMEX DIVISION TELECOMUNICACIONES  
EXPOSITOR: ING. FRANCISCO RAMIREZ CUEVAS
9. CURSO DE EDUCACION CONTINUA: FIBRAS OPTICAS  
JUNIO 1987  
CONSUMEX DIVISION TELECOMUNICACIONES  
VARIOS AUTORES

10. ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK WESTINGHOUSE CORP.
11. FUNDAMENTOS DE INGENIERIA TELEFONICA  
HERRERA PEREZ, ENRIQUE  
ED. LIMUSA
12. MANUAL DE DISEÑO DE SUBESTACIONES CAPITULO IV:  
"DISEÑO DE REDES DE TIERRA"  
COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S.A.  
1975
13. PROTECCION DE SISTEMAS DE POTENCIA E INTERRUPTORES RAVINDRANATH,  
B. & CHANDLER, M.
14. TECNICA EN TELECOMUNICACIONES  
VOL. 2  
GOESTCH  
ED. REVERTE
15. TRANSMISION DE INFORMACION, MODULACION Y RUIDO  
SCHWARTZ, MISCHA  
MC GRAW HILL  
1983

## I N D I C E

### INTRODUCCION

Generalidades en protección de sistemas eléctricos	
de potencia .....	1
Que es la protección por relevadores .....	2

### PROTECCION

Redes de tierra .....	6
Hilo piloto .....	7
Pilotos de disparo y de bloqueo .....	9
Protección direccional .....	12
Protección diferencial .....	14
Protección de sobrecarga .....	17

### FIBRA OPTICA

Historia de las comunicaciones ópticas .....	19
Panorama general .....	22
Espectro electromagnético .....	22
Indice de refracción .....	24
Ley de Snell .....	24
Reflexión total interna .....	25
Características generales .....	27
Dispersión de modos, fibras multimodo y monomodo .....	33

Fabricación de fibra óptica .....	34
Cables de fibra óptica .....	42
Instalación y empalmes .....	55-56
Aplicación de fibras ópticas en la industria eléctrica .....	78
Aplicación de fibra óptica .....	98
Apendice "A" .....	115
Apendice "B" .....	119
Bibliografía .....	121
Índice .....	123