

13  
2es



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**Facultad de Estudios Superiores  
Cuautitlán**

**TRANSMISION DE DATOS A TRAVEZ DE FIBRAS  
OPTICAS**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P r e s e n t a:**

**GUSTAVO GLORIA YEPEZ**

**Director de Tesis: Ing. Ubaldo Ramirez U.**

**1 9 9 0**

**TESIS CON  
FALLA 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.

# INDICE

CAPITULO	PAGINA	
I	INTRODUCCION .....	1
	Sistemas de comunicación.....	3
	Sistemas de fibras ópticas.....	7
II	FUNDAMENTOS Y CARACTERISTICAS	
	DE FIBRAS OPTICAS .....	9
	Leyes básicas de óptica.....	9
	Tipos de fibras.....	11
	Propagación de la luz en fibras ópticas.....	14
	Degradación; Dispersión, atenuación.....	16
III	FUENTES OPTICAS .....	19
	Diodos emisores de luz, estructura.....	19
	Diodos láser.....	23
IV	TRANSFERENCIA DE POTENCIA	
	Y ACOPLAMIENTOS .....	30
	Transferencia de potencia entre fuentes	
	y fibras.....	31
	Acoplamiento entre láser	
	y fibras ópticas.....	32
	Técnicas de empalmes y conexiones.....	34
	Sistemas de empalmes.....	37
	Conectores.....	39
V	FOTODETECTORES .....	44
	Fotodetectores tipo pin.....	45
	Fotodiodo avalancha.....	47
	Consideraciones de ruido.....	49
	Efecto de temperatura en	
	ganancia de avalancha.....	50

VI	RECEPTORES OPTICOS:.....	52
	Fundamentos en receptores ópticos.....	52
	Configuración de los receptores.....	52
	Ruido en receptores ópticos.....	55
	Receptores digitales.....	61
	Receptores analógicos.....	62
	Repetidores ópticos.....	64
VII	CABLES DE FIBRAS OPTICAS Y FABRICACION.....	66
	Características para el diseño de cable óptico.....	66
	Estructura del cable óptico.....	71
	Calidad del cable óptico.....	76
	Aplicaciones del cable óptico: Subterráneos, aéreos y submarinos.....	78
VIII	APLICACIONES COMUNES.....	82
	Sistemas telefónicos.....	82
	Medidor de temperatura.....	84
	Teleimpresión.....	86
	Sistemas de control remoto.....	87
	Transmisión de datos.....	88
IX	TRANSMISION DE DATOS.....	89
	Diseño de un circuito básico.....	89
	APENDICE A: Circuito PLL.....	109
	APENDICE B: Información técnica de cables.....	113
	CONCLUSIONES.....	121
	REFERENCIAS.....	123

## CAPITULO I

### INTRODUCCION.

Una de las principales preocupaciones que se tienen en el estudio de las telecomunicaciones es la de encontrar un medio que permita transmitir información desde un lugar a otro con con la mayor facilidad posible.

Con el paso de los años, se han venido descubriendo sistemas de comunicación que tienen sus principios en diversos fenómenos electromagnéticos y electrostáticos, tales como el telégrafo (1837), el teléfono (1876) y el primer sistema de comunicación inalámbrico: la radiofonía (1894). Seguidos por la invención de las válvulas de vacío, que permite la primera forma de amplificación electrónica y da inicio al desarrollo de la comunicación inalámbrica. Más tarde se realizaría el mayor invento dentro de la electrónica: el transistor.

Con la introducción de todos los descubrimientos que se han realizado en el campo de la electrónica a las comunicaciones, se ha logrado que en la actualidad prácticamente todos los puntos de la tierra estén encadenados entre sí, facilitando las actividades nacionales e internacionales.

Un sistema de comunicación está conformado por un transmisor de mensajes, un medio de encadenamiento y un receptor del mensaje. El medio de transmisión puede estar formado por alambres metálicos, por guías de onda o puede ser el mismo espacio libre, siendo probable que con el incremento de la distancia se presente distorsión y atenuación en el mensaje, ocurriendo también la presencia de ruido eléctrico (interferencia electro magnética), o de inducción de energía de un par a otro (cruza miento).

Con el uso de las fibras ópticas se tiene la ventaja de eliminar esa clase de problemas y darle mayor versatilidad a los sistemas.

Con el incremento en el uso de las computadoras han surgido nuevos problemas en cuanto al campo de la transmisión de datos, como el del manejo de grandes cantidades de datos usados por procesadores locales o remotos. En las computadoras se presenta el problema de tener interfaces en medios de alto ruido eléctrico y de altos requerimientos de seguridad que hay que resolver.

La mayor ventaja que se tiene al usar sistemas de fibras ópticas en la transmisión de datos, es que permite usar un gran ancho de banda, con lo que se pueden multiplexar varios canales de comunicación por un cable simple de fibra óptica y, por la característica de alta inmunidad al ruido eléctrico se incrementan los datos confiables y se reduce el número de bits de error en los sistemas de comunicación.

## SISTEMAS DE COMUNICACION.

En los últimos años ha ocurrido un gran crecimiento en la porción del espectro electromagnético utilizado para transferir información de un lugar a otro. La razón de esto es que, en los sistemas de comunicación se transfieren los datos por superposición de la señal de información, sobre una onda sinusoidal conocida como portadora; En el receptor es separada la información de la portadora y procesada como se requiere.

La cantidad de información que se va a transferir está en relación directa con el rango de la frecuencia en el que opera la onda portadora, incrementando la frecuencia de esta se hace crecer también el posible ancho de banda de transmisión y en consecuencia, se tiene una gran capacidad de información.

Así fué como los descubrimientos de sistemas de comunicación fueron usando progresivamente más altas frecuencias (cortas longitudes de onda), con mayores anchos de banda y mayor capacidad de información. Esta situación llevó al nacimiento de la televisión, radares y cadenas de micro-ondas.

La porción del espectro electromagnético que es usado en comunicaciones se muestra en la figura I.1.

Los medios de transmisión usados en este espectro incluyen guías de onda, alambres metálicos y ondas de radio para comunicaciones por radio AM y FM, teléfono, televisión, banda civil (CB), radar y satélites, todas estas usadas hoy en día. Las frecuencias que utilizan las anteriores aplicaciones están en un rango de 300 Hz. en la banda de audio, hasta 90 GHz. en la banda milimétrica.

DESIGNACION	MEDIO DE TRANSMISION	APLICACION	
ULTRAVIOLETA	FIBRAS OPTICAS	TELEFONO	$10^{15}$ Hz
VISIBLE		DATOS	$10^{14}$ Hz
INFRARROJO		VIDEO	

LONGITUD DE ONDA	DESIGNACION	MEDIO DE TRANSMISION	APLICACION	FRECUENCIA	
1cm	ONDAS MILIMETRICAS	GUIAS DE ONDA	NAVEGACION SATELITE-SATELITE	1000Hz	
10cm	SUPER ALTA FRECUENCIA ( S H F )		MICRO-ONDAS DE RADIO	SATELITE-SATELITE	100Hz
1m	ULTRA ALTA FRECUENCIA ( U H F )		ONDA CORTA DE RADIO	TIERRA-SATELITE	10Hz
10m	MUY ALTA FRECUENCIA ( V H F )	UHF TV AERONAUTICA VHF TV Y FM RADIO MOVIL		1000Hz	
100m	ALTA FRECUENCIA ( H F )	CABLE COAXIAL	NEGOCIOS RADIO AFICIONADOS INTERNACIONAL BANDA CIVIL	10Hz	
1Km	MEDIA FRECUENCIA		ONDA LARGA DE RADIO	RADIO A.M.	1MHz
10Km	BAJA FRECUENCIA ( M F )	PAR DE ALAMBRE	AERONAUTICA CABLE SUBMARINO NAVEGACION	1000Hz	
100Km	MUY BAJA FRECUENCIA ( V L F )		RADIO TRANS-OCEANICO	10KHz	
	AUDIO		TELEFONO TELEGRAFO	1KHz	

Fig. I.1 Ejemplo de sistemas de comunicación en el espectro electromagnético.

Los sistemas de fibras ópticas se desarrollaron aún más al combinar la tecnología de los semiconductores, que provee las fuentes de luz necesarias y los fotodetectores con la tecnología de las guías de onda ( en que se basan las fibras ópticas).

El resultado fué una cadena de transmisión que contaba con mayores ventajas sobre sistemas convencionales, de hilos de cobre, usados en telecomunicaciones; Por ejemplo, se tienen menos pérdidas en fibras ópticas y estas cuentan con un ancho de banda más amplio, esto permite que un mayor número de datos puedan ser enviados en largas distancias, reduciendo el número de alambres y el número de repetidores. Contando también con el bajo peso del cable y el pequeño tamaño de las fibras, con lo que se tienen ventajas sobre cables abultados y pesados como los subterráneos, siendo también prácticos en instalaciones aéreas y en maniobras militares, ya que este tipo de cables puede ser arrollado y tendido con facilidad.

Con todas las ventajas de las fibras ópticas se presenta un crecimiento en las actividades de todas las áreas referentes a los sistemas de comunicación que usaban esta tecnología. Con lo que resultó un gran avance tecnológico en fuentes ópticas, fibras, fotodetectores y conectores. Para 1980 los sistemas de comunicación por fibras ópticas más usados son en televisión por cable, teléfono, etc.

Otra porción importante del espectro electromagnético comprende la región óptica, donde se acostumbra especificar la banda en términos de longitud de onda, en vez de frecuencia ( como en el caso de la región de radio). El espectro óptico abarca desde al rededor de 50 nm (rayos ultravioleta) hasta cerca de 100  $\mu$ m (más allá de los rayos infrarojos), siendo visible el espectro de luz entre los 400 y 700 nm. Se usan para esta porción del espectro, como medios de transmisión, canales atmosféricos o guías de onda.

Con la llegada del rayo láser en 1960 se logró tener una fuente óptica más coherente. La frecuencia del láser es del orden de  $5 \times 10^{14}$  Hz, con lo que se cuenta con una gran capacidad de información. Al experimentar con el rayo láser, usando la atmósfera como canal de transmisión, se comprobó la facilidad de modular una onda portadora óptica a muy alta frecuencia. Pero los altos costos de instalación que se requerían y los gastos para el desarrollo de los componentes necesarios, así como las limitaciones debidas a la nieve, lluvia, niebla y polvo hacían incoesteable un sistema de comunicación de este tipo.

Continuando con los experimentos sobre canales ópticos atmosféricos, se llegó al desarrollo de las fibras ópticas para hacer más viable la comunicación. Al principio se tenían pérdidas muy elevadas, de más de 1000 dB/Km lo que hacía ver a las fibras ópticas como imprácticas. Hasta que en 1970 se obtuvo una fibra óptica con una atenuación de 20 dB/Km, iniciándose una nueva era en las comunicaciones por fibras ópticas.

## SISTEMAS DE FIBRAS OPTICAS.

La primera generación de fibras ópticas estaba diseñada para rangos de 2 a 50 Mbits/seg. Los componentes electro-ópticos que usan estos sistemas operan entre los 810 y 890 nm de longitud de onda, siendo las pérdidas de transmisión del cable de 4 a 6 dB/Km después de la instalación y empalme. Esto hace inecesaria la instalación de repetidores en tramos de 5 a 10 Km en redes de comunicación metropolitanas.

En la segunda generación de las fibras ópticas se tienen sistemas operando a 1.3  $\mu$ m de longitud de onda, con pérdidas en el cable óptico de 1 dB/Km con lo que se reduce la necesidad de instalar repetidores.

En suma con las otras aplicaciones, la tecnología de fibras ópticas se está usando en plantas eléctricas de potencia para transmitir información a sistemas de protección, supervisión y control.

Otra creciente aplicación de las fibras ópticas es en sistemas de circuito cerrado, que tradicionalmente se realizaban con alambres de cobre. Actualmente existe la demanda de nuevos servicios en el hogar o en la oficina, como T.V. educacional, correo electrónico, información bancaria y ventas. Esto ha permitido el crecimiento del interés en la introducción de la tecnología de fibras ópticas en sistemas de circuito cerrado, que gracias al enorme número de ventajas, permite diseñar sistemas de multiservicios.

En la actualidad varias empresas en el mundo han puesto en práctica la tecnología de fibras ópticas en sistemas de circuito cerrado: El Sistema de Información Visual y Optica Altamente Interactivo ( Hi-OVIS), usado en Japón; El YORKVILLE y ELIE RURAL en Canadá; BIARRITZ en Francia entre otros.

## CAPITULO II.

### FUNDAMENTOS Y CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

#### LEYES BASICAS DE OPTICA.

Uno de los parámetros fundamentales en materiales ópticos es el índice de refracción o índice refractivo. En el espacio libre, una onda luminosa viaja a una velocidad  $c = 3 \times 10^8$  m/seg. Sobre un material dieléctrico o no conductor la luz viaja a una velocidad ( $v$ ) característica de cada material y que es menos que el valor de  $c$ .

El índice de refracción ( $n$ ) de un material está dado por la relación entre la velocidad de la luz en el espacio libre y en el material, de este modo:

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

Los valores típicos de ( $n$ ) son: 1.00 para el aire. 1.33 para el agua, 1.50 para el vidrio y 2.42 para el diamante.

Cuando un rayo atraviesa los diferentes medios, una parte del rayo es reflejado sobre el primer medio y otra parte es refractado en el segundo material. La relación de los índices de refracción de ambos materiales está dada por la Ley de Snell:

$$n_1 \text{ sen}\theta_1 = n_2 \text{ sen}\theta_2$$

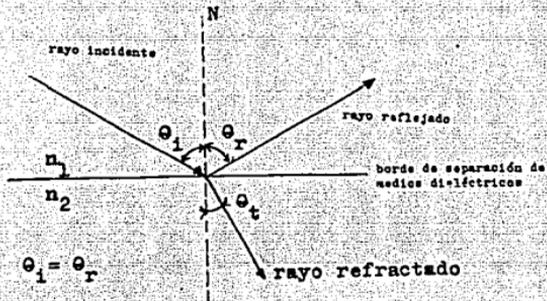
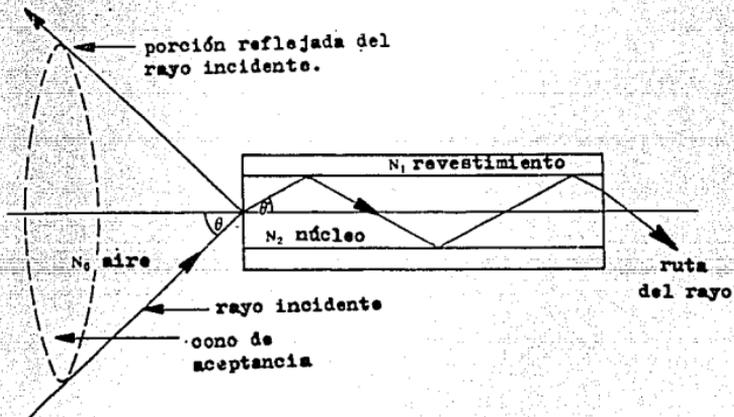


Fig.II.1 Refracción y reflexión de un rayo de luz en el borde de un material.

Fig.II.2 Rayo meridional y representación del mecanismo de propagación en una fibra de índice escalonado ideal.



Donde:

$n_1$  es el índice de refracción del primer medio.

$n_2$  es el índice de refracción del segundo medio.

$\theta_i$  es el ángulo entre el rayo incidente y la normal al borde de los medios.

$\theta_t$  es el ángulo entre la normal y el rayo refractado como se indica en la figura II.1.

La apertura numérica (NA) es una medida de la capacidad de coleccionar luz de una fibra óptica y está en función de la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento. Una apertura numérica amplia permite una entrada de luz mayor a la fibra, aunque una NA excesiva puede ocasionar el incremento en la atenuación. La apertura numérica (también conocida como cono de aceptación, grado de apertura, etc.) sirve para calcular el acoplamiento entre fibra y fuente óptica (ver figura II.2). Sus valores son normalmente entre 0.14 y 0.50 y está dada por la relación:

$$NA = n \sin \theta_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

#### TIPOS DE FIBRAS.

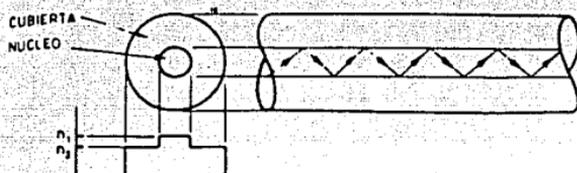
Una fibra óptica es una guía de onda electromagnética que opera a frecuencias ópticas. Las propiedades de la transmisión de una guía de onda óptica están dadas por las características de la misma ya que esta puede afectar la propagación a través de la fibra.

La forma como viaja un grupo de ondas electromagnéticas a través de la guía es conocida como el modo de guía de la onda. Cada modo de guía es un modelo de líneas de campo electromagnético, las cuales se repiten a través de la fibra a intervalos iguales a la longitud de onda.

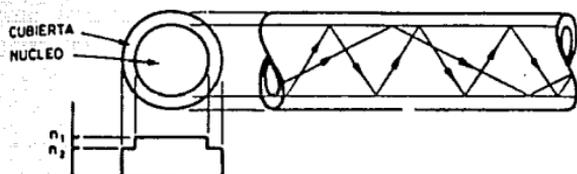
La estructura más aceptable de la fibra óptica es la cilíndrica, con radio ( $a$ ) e índice de refracción ( $n_1$ ) para el núcleo y ( $n_2$ ) para el revestimiento, siendo  $n_1$  mayor que  $n_2$  (fig II.2). Aunque en principio no es necesario el revestimiento para que la propagación se lleve a cabo en el núcleo, puede reducir las pérdidas por dispersión debidas a discontinuidades en la superficie del núcleo, dá a la fibra fortaleza mecánica y protege al núcleo de absorción de contaminantes en su superficie.

Las variaciones en la composición del material del núcleo hacen que existan dos tipos comunes de fibras (figura II.3) , en el primer caso, se tienen las fibras de índice escalonado. (a), el índice de refracción del núcleo es uniforme y soporta cambios repentinos (escalonamientos) del borde del revestimiento.

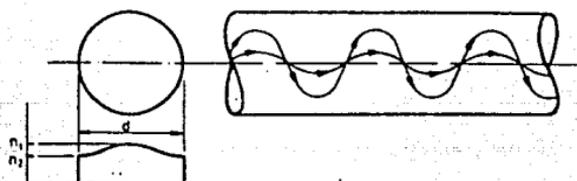
En el segundo caso (b), el índice de refracción del núcleo está hecho para variar en función de la distancia radial desde el centro de la fibra; Este tipo se conoce como fibra de índice gradual.



Fibra monomodal de índice escalonado.



Fibra multimodal de índice escalonado.



Fibra multimodal de índice gradual.

Fig.II.3 Comparación de fibras ópticas de modo simple y multimodal de índice escalonado y gradual.

Ambos tipos pueden ser de modo simple o multimodal. Como su nombre lo indica, una fibra de modo simple sostiene sólo un modo de propagación, mientras que la fibra multimodal contiene varios cientos de modos. En la figura II.3 se da una idea de las dimensiones de las fibras. Las fibras multimodales ofrecen mayores ventajas sobre las fibras de modo simple (o monomodo), como se verá más adelante las fibras multimodales hacen más fácil el envío de potencia en la fibra y facilitan la interconexión con fibras similares; Además de que se puede transferir potencia mediante fuentes de diodos emisores de luz (leds), por su parte las fibras de modo simple necesitan fuentes de diodos láser, aunque estos tienen menores pérdidas ópticas, las fuentes de leds son fáciles de hacer y son menos costosas, requieren circuitería menos compleja y tienen tiempos de vida más prolongados que los diodos láser.

Una desventaja de las fibras multimodales es que sufren dispersión intermodal, que se verá más adelante.

#### PROPAGACION DE LA LUZ EN FIBRAS OPTICAS.

Para simplificar el análisis de la propagación de los rayos ópticos a través de las fibras se consideran dos tipos de rayos: meridionales y oblicuos.

Los rayos meridionales están confinados a los planos meridionales de la fibra, que son los planos que contienen el eje de simetría del núcleo de la fibra. Dado que un rayo meridional se extiende en un plano simple, su trayectoria es fácil de rastrear a través de la fibra; Los rayos meridionales pueden ser de dos tipos: de rebote, que viajan a través de la fibra de acuerdo con las leyes de la óptica geométrica y los rayos no rebotantes que se refractan fuera del núcleo de la fibra.

Los rayos oblicuos no están confinados a un plano simple, estos tienden a seguir una trayectoria helicoidal ( fig II.4 ) , estos rayos son difícilmente rastreables, por lo que su análisis es poco posible.

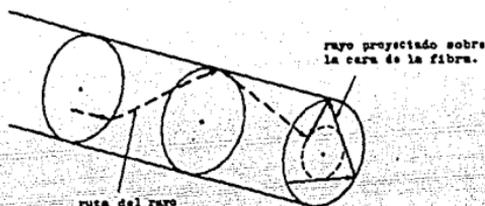


Fig.II.4 Representación de rayos ópticos oblicuos a través de una fibra de índice gradual.

Los rayos meridionales son mostrados en la figura II.2, presentada en páginas anteriores. Un rayo de luz entra al núcleo desde un medio con índice de refracción igual a 'n' y con un ángulo  $\theta_0$  con respecto al eje de la fibra. El rayo meridional describe una trayectoria en "zig-zag" a través de la fibra cruzando el eje de la misma después de ser reflejada, para tener reflexión total ( sin refracción en el revestimiento) se debe tener un ángulo mínimo  $\theta_{\min}$  dado por la ley de Snell:

$$\text{sen } \theta_{\min} = \frac{n_2}{n_1}$$

## DEGRADACION.

En su trayectoria por la fibra óptica la señal puede sufrir degradación en forma de pérdidas, como atenuación y dispersión.

La atenuación es la medida de las pérdidas de la señal de luz a lo largo de la fibra óptica, la atenuación está definida como el rango de pérdidas de potencia desde la entrada hasta la salida de la fibra óptica de una longitud determinada, este fenómeno se debe principalmente a la absorción ( por impurezas en el material), esparcimiento ( fluctuaciones en la densidad del vidrio) y pérdidas de radiación ( por pequeños dobleces en el núcleo de la fibra).

En la figura II.5 se muestra la curva general de atenuación en función de la longitud de onda.

El cálculo de la atenuación ' $\alpha$ ' está dado por la relación:

$$\alpha = 10 \log \frac{P_{in}/P_{out}}{L} \quad \text{dB/Km}$$

Siendo:  $P_{in}$  la potencia de entrada a la fibra.

$P_{out}$  la potencia de salida de la fibra.

$L$  la longitud de la fibra.

Para una fibra ideal se tendría que,  $P_{in} = P_{out}$  con una atenuación de 0 dB/Km, lo que en la práctica es imposible. En la actualidad se tienen pérdidas de 3 dB/Km en promedio en las fibras ópticas.

Cuando una onda se refracta en un medio cuyo índice de refracción depende de la longitud de onda, el ángulo de refracción también dependerá de la longitud de onda. Si la onda inci

dente se compone de varias frecuencias superpuestas, cada frecuencia se refractará según el ángulo diferente, este fenómeno se denomina dispersión material.

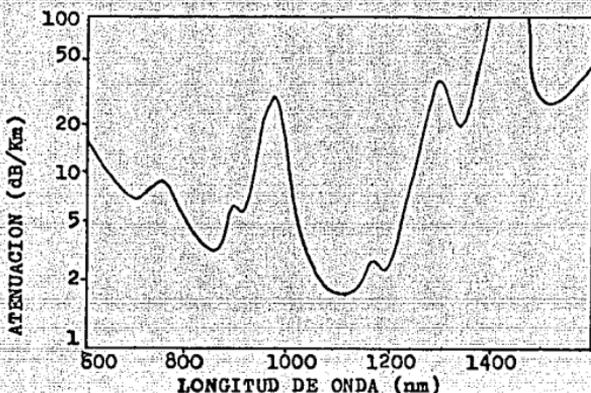


Fig.II.5 Curva de atenuación contra longitud de onda para una fibra de tecnología actual.

Un resultado de la distorsión en la señal es que un pulso de luz puede ensancharse en su trayecto por la fibra, llegando a interponerse con otro pulso vecino (fig II.6) con lo que el receptor de la señal no puede distinguir los pulsos individuales y causa errores. A este fenómeno se le conoce como dispersión modal o intermodal.

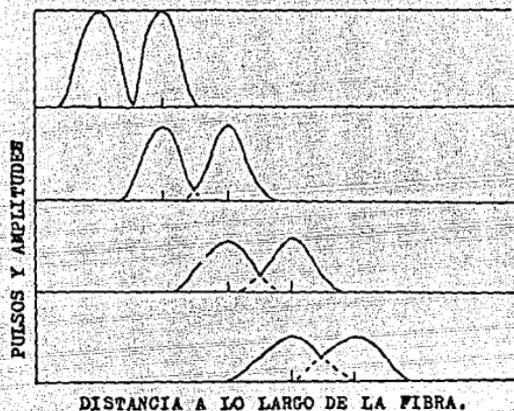


Fig. II.6 Ensanchamiento y atenuación de dos pulsos adyacentes y su paso a través de la fibra.

### CAPITULO III.

#### FUENTES OPTICAS.

##### DIODOS EMISORES DE LUZ.

Para sistemas ópticos que requieren rangos de bits menores que aproximadamente 50 Mb/seg. junto con acoplamiento a fibra multimodal, se suele usar LEDS como mejores fuentes de luz. Los LEDS requieren de circuitería menos compleja que la de diodos láser y pueden ser fabricados con menor tamaño y alto rendimiento.

##### ESTRUCTURAS DE LEDS.

Para utilizarse en transmisión de datos un LED debe tener alta salida de radiación y rápida respuesta en tiempo. La radiación o brillo es la medición en watts de la potencia óptica - radiada dentro de un ángulo sólido por unidad de área de la su perficie de emisión.

Se necesitan altas radiaciones para acoplar suficientemen te altos niveles de potencia óptica dentro de la fibra. El - tiempo de respuesta en cuestión es el tiempo de retardo entre la aplicación del pulso de corriente y la aparición de la po - tencia óptica.

Para conseguir alta radiación la estructura del LED puede proveerse de medios para confinar los portadores de carga y es timular la emisión óptica a la región activa de la juntura (pn) donde se lleva a cabo la recombinación radiante.

Para conseguir más portadores de carga y confinamiento óptico, se han estudiado estructuras tales como heterojunturas dobles o simples y homojunturas. La estructura más conveniente en usos es la mostrada en la figura III.1 referida como doble heterojuntura ( o heteroestructura) por las dos diferentes mezclas de capas en cada lado de la región activa.

FUNCIÓN	MATERIAL	ESPESOR
capa de contacto metálica.		
usada para mejor contacto al metal	tipo p Ga	1µm
guía de luz y confinamiento de portadora	tipo p Ga <sub>1-x</sub> As <sub>x</sub> P	1µm huecos
región de recombinación	tipo n Ga <sub>1-y</sub> As <sub>y</sub> P	0.3 µm $\int \frac{hv}{\lambda}$
guía de luz y confinamiento de portadora	tipo n Ga <sub>1-x</sub> As <sub>x</sub> P	1 µm electrones
substrate	tipo n GaAs	
Capa de contacto metálica		

Fig.III.1 Diagrama seccional de un emisor de luz de doble heterojuntura típico GaAs. En esta estructura x y para confinamiento de portadora y guía óptica.

Con esta estructura se logra confinar en la capa central a los portadores de carga y el campo óptico. Las diferencias de los anchos de banda de las capas adyacentes confinan la carga portada, mientras las diferencias en los índices de refracción de las capas adjuntas confinan el campo óptico dentro de la capa activa central. Este doble confinamiento permite alta eficiencia y alta radiación.

Las dos configuraciones básicas de LEDS usadas en fibras ópticas son: emisores de superficie ( o emisores frontales) y emisores de borde. En los primeros, el plano de la región activa de emisión de luz se orienta perpendicularmente al eje de la fibra, como se muestra en la figura III.2

En esta configuración se tiene un hueco en el sustrato del dispositivo, dentro del cual la fibra se fija de modo que reciba la luz emitida. El área activa circular en la superficie de emisión es nominalmente de 50  $\mu\text{m}$  de espesor. El ángulo de emisión es de  $120^\circ$ .

Los emisores de borde representados en la figura III.3 , consisten en una región de juntura activa, que es la fuente de luz incoherente y dos capas de guía que tienen un índice refractivo más bajo que el de la región activa, pero más alto que el del material circundante. Esta estructura forma un canal de guía de onda que dirige la radiación óptica hacia el núcleo de la fibra. La franja de contacto con la fibra óptica ( con diámetros de 50 a 100  $\mu\text{m}$ ) de los emisores de borde es de 50 a 150  $\mu\text{m}$  de ancho. El patrón de emisión es más direccional que el de los emisores de superficie.

En el plano paralelo a la juntura, donde no hay efecto de guía de onda, el rayo emitido es lambertiano ( O sea que varía como coseno del ángulo  $\theta$ ) con un ancho para potencia media de  $\theta_1 = 120^\circ$ . En el plano perpendicular a la juntura el ancho del rayo para potencia media  $\theta_2$  debe ser del orden de  $25^\circ$  a  $35^\circ$  para una selección apropiada de una fibra óptica.

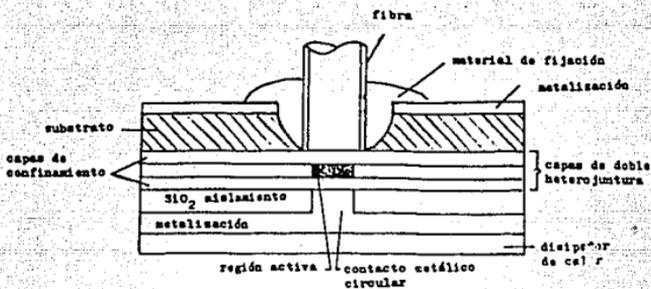


Fig. III.2 LED de superficie de alta radiación. La región activa está limitada por una sección circular de área compatible con la cara final del núcleo de la fibra.

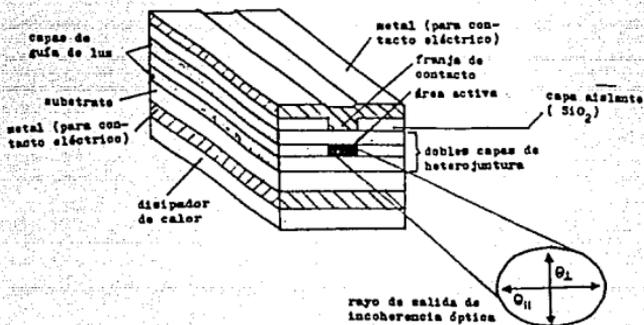


Fig. III.3 LED de doble heterojuntura de emisor de borde, el rayo de salida es lambdiano en el plano de la juntura ya ( $\theta_0 = 120^\circ$ ) y altansante direccional ( $\theta_0 = 10^\circ$ ).

## DIODOS LASER

Los diodos láser tienen dimensiones variadas. El medio de difusión puede ser un gas, líquido o cristal (estado sólido) o un semiconductor.

Para sistemas de fibras ópticas, las fuentes láser usan exclusivamente diodos láser semiconductores. Estos son similares a otros láser, tales como los de estado sólido convencionales y de gas, en los que la radiación emitida tiene coherencia espacial y temporal, esto es, la radiación de salida es altamente monocromática ( dentro de una sola longitud de onda) y los rayos de luz son muy direccionales.

No obstante sus diferencias, el principio básico de operación es el mismo para todos los tipos de láser. La acción láser (luz amplificada por emisión estimulada de radiación) es el resultado de tres pasos que son: absorción del fotón, emisión espontánea y emisión estimulada.

En la figura III.4 se muestran los tres pasos anteriores con diagramas simples de dos niveles de energía. Donde  $E_1$  es el estado a tierra de la energía y  $E_2$  es el estado de excitación de la energía. Una transición entre estos dos estados implica la absorción o emisión de un fotón de energía. Normalmente el sistema se encuentra en el estado de energía a tierra. Cuando un fotón 'h' entra al sistema, un electrón en estado  $E_1$  puede absorberlo y ser excitado al nivel  $E_2$  como en la figura III.4a. Como este es un estado inestable, el electrón puede volver al nivel de tierra, de este modo, se emite un fotón de energía. Esto ocurre sin algún estímulo externo y se llama emisión espontánea.

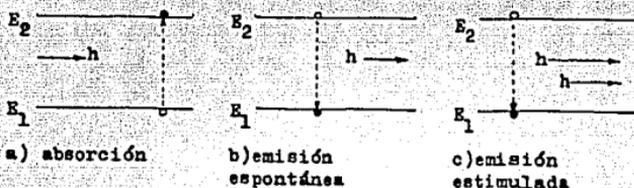


Fig.III.4 Los tres pasos en el proceso de la acción láser. El círculo en blanco representa el estado inicial del electrón y el círculo negro representa el estado final. Los fotones incidentes  $h$  representan a la izquierda de cada diagrama y los fotones emitidos en la derecha.

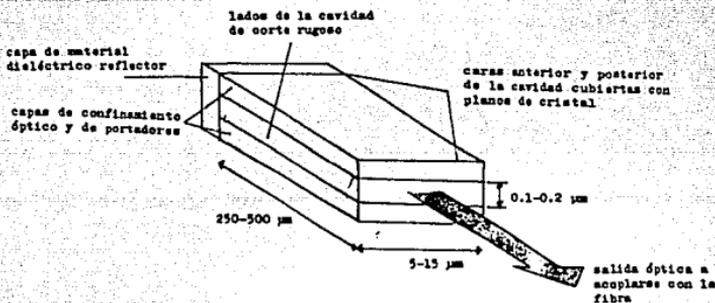


Fig.III.5 Cavity resonante "Fabry-Perot" de un diodo láser. Las caras anterior y posterior de la cavidad, cubiertas con planos de cristal, tienen la función de espejos de reflexión parcial.

El electrón puede también ser inducido a tener transición descendente desde el nivel de excitación al nivel de tierra, por una estimulación externa. Como se muestra en la figura III.4c, si un fotón de energía ' $h$ ' penetra al sistema mientras que el electrón está inmóvil en el estado de excitación, el electrón es estimulado para caer inmediatamente al nivel de tierra y dar salida a un fotón de energía ' $h$ '. Este fotón emitido está en fase con el fotón incidente en el sistema, pudiendo ser absorbido.

#### ESTRUCTURA DE LOS DIODOS LASER.

Para sistemas de fibras ópticas que requieren de anchos de banda grandes (aproximadamente 50 MHz), el diodo semiconductor de inyección láser es más útil que el LED.

Los diodos láser típicos tienen tiempos de respuesta menores a 1 nseg. Con anchos de banda de 2 nm o menores y en general son capaces de acoplar varios miliwatts de potencia luminosa dentro de fibras ópticas con núcleos pequeños y poca apertura numérica.

La constitución de los diodos láser es más complicada que la de los LED por el requerimiento de confinamiento de corriente en una pequeña cavidad de radiación. La radiación en el láser es generada dentro de una cavidad de resonancia como se muestra en la estructura del láser "Fabry-Perot" de la figura III.5. En este diodo, la cavidad de resonancia es encerrada por espejos de reflexión parcial, con lo que se logra mayor radiación luminosa.

En otro tipo de diodo láser como en el "Distributed-Feedback Laser" (DFB), los cortes laterales no necesitan regeneración óptica como los espejos del Fabry-Perot", aunque la fabricación de ambos dispositivos es similar, en el DFB la acción de envío de láser se obtiene de rejillas reflectoras o variaciones periódicas en el índice de refracción (llamadas corrugaciones de realimentación distribuida), la cual es incorporada dentro de la estructura multicapas, a través de la longitud del diodo (ver fig. III.6).

En general la salida óptica se necesita sólo en la cara frontal del láser, la cual se alinea con la fibra óptica. En la cara posterior del diodo se coloca un dieléctrico reflector que reduce las pérdidas ópticas en la cavidad. La radiación óptica en la cavidad de resonancia del diodo láser establece un patrón de líneas magnéticas y eléctricas, llamadas modos de la cavidad, estas líneas pueden ser convenientemente separadas en dos modos independientes: transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM) y pueden describirse en términos de las variaciones longitudinales, laterales y transversales de los campos magnéticos a través del eje de la cavidad. Los modos longitudinales se refieren a la longitud de la cavidad y determinan la estructura principal del espectro de frecuencia de la radiación óptica emitida. Como  $L$  (longitud) es más larga que la longitud de onda láser (de aproximadamente  $1\mu\text{m}$ ), pueden existir muchos modos longitudinales, estos dependen de la preparación de la pared lateral y el ancho de la cavidad y determinan la forma del perfil lateral del rayo láser. Los modos transversales están asociados con el campo electromagnético y el perfil del rayo en

la dirección perpendicular al plano de la juntura pn. Estos modos son de gran importancia puesto que determinan las características del láser, como patrón de radiación (distribución angular de la potencia óptica de salida) y la densidad de corriente.

La amplificación óptica de modos selectos está provista por el mecanismo de retroalimentación de la cavidad óptica. En las repetidas veces que pasa entre los espejos paralelos de reflexión parcial, una porción de la radiación asociada con los modos, es retenida y amplificada durante cada vuelta a través de la cavidad.

#### GENERADORES DE SEÑAL OPTICA.

Para aplicaciones digitales los LEDS deben aceptar corrientes de 50 a 300 mA. Los circuitos más usuales son muy simples y no requieren de análisis minucioso, como los circuitos de las figuras III.7 y III.8. En el primero se tiene un TBJ en configuración emisor común, en este circuito se proporciona la polarización al LED a través de la resistencia  $R_3$ , esta polarización es independiente del transistor, la resistencia  $R_2$  limita la corriente a través del LED.

Para obtener la máxima velocidad de respuesta en un LED debe usarse un generador de señal con baja impedancia de salida esto puede conseguirse colocando un elemento de monitoreo en paralelo con el LED. Este puede polarizarse en inversa al apagarse para facilitar la eliminación de carga, como en la figura III.8, en este circuito se tiene a  $V_{ce}$  a un potencial más ne-

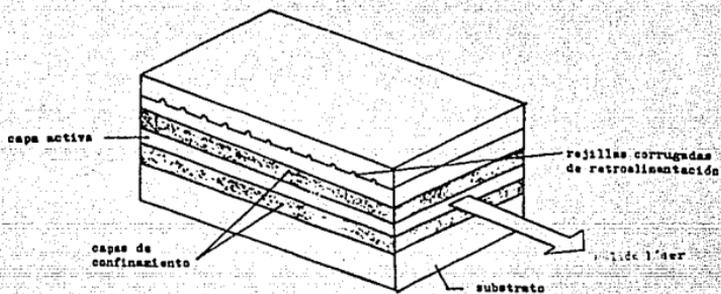


Fig. III.6 Estructura de un diodo láser de retroalimentación distribuida (DFB).

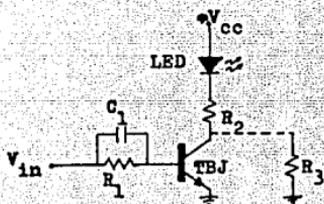


Fig. III.7 Generador de señal óptica a base de un TBJ.

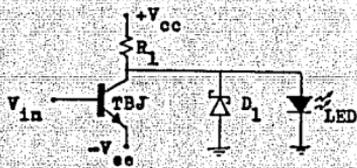


Fig. III.8 Configuración que demanda potencia de las fuentes D.C.

gativo que el de tierra, pero el diodo shottky limita tal voltaje de polarización en inversa. Pero si no se quiere esta polarización en inversa, el emisor del transistor se puede aterrizar, en este caso el diodo shottky no se requiere.

## CAPITULO IV

### TRANSFERENCIA DE POTENCIA Y ACOPLAMIENTOS.

La transferencia de potencia desde una fuente luminosa dentro de una fibra óptica implica consideraciones como la apertura numérica, el tamaño del núcleo, el índice de refracción y la diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento, además del tamaño de la fuente óptica, su radiación y distribución angular de potencia.

Los LEDS operan con un intervalo típico de corriente de 50 a 300 mAmp. y voltajes de 1.5 a 2.5 volts entre terminales, lo que se traduce en potencia óptica a un rango de 1 a 10 mW ( 0 a 20 dBm). De esta potencia solo se acopla del 1 al 10 % dentro de la fibra, dependiendo del diámetro de esta, la estructura del diodo y la apertura numérica.

La potencia óptica de salida de una fuente luminosa puede medirse por su radiación o brillo (B) a una corriente del diodo específica. La radiación se define como la potencia óptica radiada sobre un ángulo sólido por unidad de área de la superficie de emisión.

$$B = P_s(A\theta)$$

Siendo  $P_s$  la potencia óptica de salida de la fuente.

A el área de la superficie de emisión.

$\theta$  el ángulo de radiación.

## TRANSPERENCIA DE POTENCIA ENTRE FUENTES Y FIBRAS

La radiación puede variar de un punto a otro en la superficie de emisión, pero para simplificar su análisis se supone uniforme en toda la superficie de la fuente.

La superficie de emisión de un LED se caracteriza por su patrón de salida lambertiano, por lo que el brillo se ve igual en cualquier dirección. El sistema de coordenadas esféricas es usado para caracterizar el patrón de emisión de una fuente óptica (fig.IV.1)

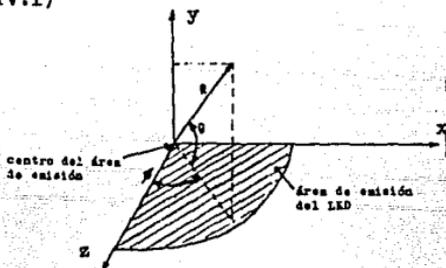


Fig.IV.1 Sistema de coordenadas esféricas para caracterizar el patrón de emisión de una fuente óptica.

La potencia es liberada en un ángulo  $\theta$  medido desde la normal a la superficie de emisión y varía como  $\cos \theta$  ya que el área proyectada en la superficie de emisión varía como  $\cos \theta$  en dirección de la vista. El patrón de emisión de una fuente lambertiana sigue la siguiente relación:

$$B(\theta, \phi) = B_0 \cos \theta$$

siendo  $B_0$  la radiación a lo largo de la normal a la superficie de emisión. El tipo de radiación de este tipo es el de la fig.

IV.2

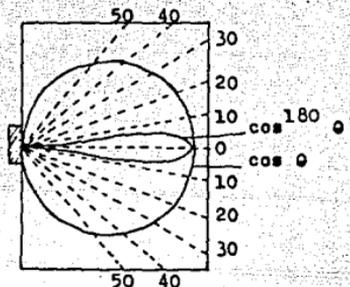


Fig. IV.2 Patrón de radiación para una fuente lambertiana y la salida lateral de un diodo láser altamente direccional.

Los LEDs de emisión de borde y los diodos láser tienen un patrón de emisión más complejo.

La potencia óptica acoplada a la fibra puede calcularse con la relación:

$$P_{LED} = \pi^2 r_B^2 B_0 (NA)^2 \quad 2\pi^2 r_B B_0 n_1 \Delta$$

siendo  $P_{LED}$  la potencia del LED para acoplo con fibra de modo escalonado. ' $r_B$ ' el radio de la fuente. ' $NA$ ' la apertura numérica de la fibra. ' $n_1$ ' el índice de refracción del núcleo y  $\Delta$  la diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento:  $\frac{n_1 - n_2}{n_1}$

El desarrollo matemático de las expresiones anteriores se puede encontrar en la referencia 1, capítulo 5.

#### ACOPLAMIENTO ENTRE LASER Y FIBRAS OPTICAS.

El patrón de radiación de los láser tiene un ancho total máximo FWHM (Full-width Half-Maximum) de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  en el plano perpendicular a la juntura del área activa y un FWHM de  $5^\circ$  a

$10^\circ$  en el plano paralelo a la juntura, por lo que la distribución angular de salida es mayor que el ángulo de aceptación de la fibra y por lo tanto el área de emisión láser es mucho más pequeña que el núcleo de la fibra. El FWHM es el ancho espectral entre los puntos en que la potencia óptica disminuye a la mitad de su valor pico.

El uso de pequeñísimas lentes esféricas puede hacer que el acoplamiento entre diodos láser y fibras ópticas sea más eficiente. Lentes esféricas de cristal con índice refractivo de 1.9 y diámetros entre 50 y 60  $\mu\text{m}$  fueron colocados en las caras finales de las fibras de índice gradual cuyo diámetro del núcleo es de 50  $\mu\text{m}$  y apertura numérica de 0.2 . Los valores medidos del FWHM del rayo láser de salida fué:

Entre 3 y 9  $\mu\text{m}$  en el campo paralelo cercano a la juntura.

Entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  en el campo perpendicular a la juntura.

Entre  $15^\circ$  y  $55^\circ$  en el campo paralelo a la juntura.

## TECNICAS DE EMPALME Y CONEXIONES.

Para conectar dos secciones de fibra óptica se usan los empalmes y conectores ópticos, los empalmes consisten en uniones permanentes entre dos secciones de fibras ópticas, los métodos que existen para los empalmes tienen como objetivo reducir las pérdidas introducidas por el mismo empalme, alta confiabilidad mecánica, durabilidad y facilidad de realización.

Los conectores ópticos se requieren cuando se necesita conectar y desconectar dos secciones de fibras ópticas o una fibra del equipo terminal, tantas veces como sea necesario; Los conectores ópticos le dan versatilidad a los sistemas, sin embargo tienen pérdidas de aproximadamente 1.0 dB.

Las pérdidas debidas a una interconexión se clasifican en intrínsecas y extrínsecas. Las primeras se deben a la variación en las características de las fibras y no se pueden eliminar en el proceso de interconexión. Las pérdidas extrínsecas se asocian a la preparación de las superficies en los extremos de la fibra (pérdidas por rugosidades) y tolerancias mecánicas en los alineamientos. Estas pérdidas se sujetan a la adecuada operación de interconexión y diseño de conectores.

Cuando existe diferencia de diámetros entre las fibras la atenuación se calcula con la relación:

$$P_{dB} = 10 \log(D_r/D_t)^2$$

Donde  $D_t$  es el diámetro del núcleo de la fibra transmisora y  $D_r$  es el diámetro del núcleo de la fibra receptora.

La separación entre dos tramos de fibra óptica origina - pérdidas que dependen de la apertura numérica y se describe mediante la siguiente relación:

$$P_{dB} = -10 \log \left[ \frac{D/2}{D/2 + L \tan[\arcsen(NA/n)]} \right]$$

Donde:

- $P_{dB}$  es la pérdida debida a la separación entre fibras.
- $D$  es el diámetro del núcleo de la fibra ( en  $\mu m$ ).
- $L$  es la separación entre los tramos de fibra en  $\mu m$ .
- $NA$  es la apertura numérica.
- $n$  es el índice de refracción del medio.

La atenuación por desplazamiento lateral se presenta cuando los extremos de las fibras no son concéntricos y está dada por:

$$P_{dB} = -10 \log \left[ 1 - \frac{2(L/D) \left( 1 - (L/D)^2 \right)^{1/2}}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{L}{D} \right) \right]$$

Siendo  $D$  el diámetro del núcleo de la fibra y  $L$  la separación lateral.

Otras atenuaciones se presentan por desplazamiento axial o desigualdad angular, por rugosidades y presencia de partículas extrañas. En la figura IV.3 se muestra la variación de la atenuación para los casos antes mencionados.

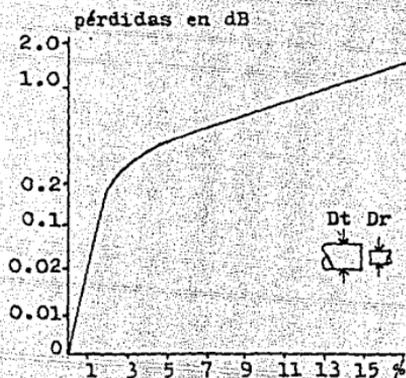


Fig.IV.3a Variación de la pérdida en potencia en función de la diferencia de diámetros de núcleo (en por ciento).

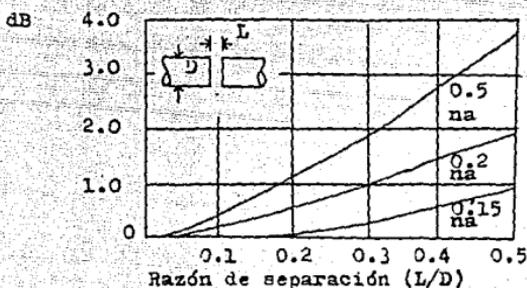


Fig.IV.3b Pérdidas de potencia en dB en función de la relación (L/D) para varias aperturas numéricas.

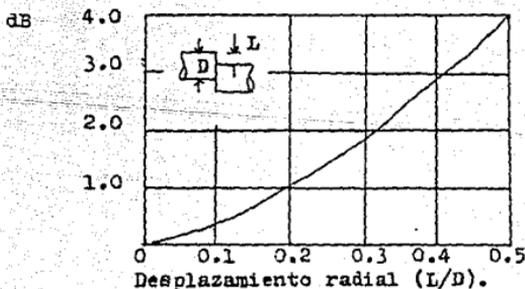


Fig.IV.3c Pérdidas en potencia en función del desplazamiento radial (L/D).

## SISTEMAS DE EMPALMES.

Hay tres tipos de empalmes básicos: fusión por arco eléctrico, fusión por combustión de gases y acoplamiento mecánico.

### Empalme de fusión por arco eléctrico.

En esta técnica se unen, bajo el microscopio, dos secciones de fibra óptica y se les aplica una descarga por arco eléctrico, con esto, las fibras se funden quedando unidas en sus extremos y alineadas. La atenuación resultante es del orden de 0.14 dB máximo.

El equipo para este tipo de empalmes puede portarse en una maleta, lo que facilita trabajos de campo, sin embargo requiere de una fuente de alimentación. En la figura IV.4a se tiene el diagrama esquemático del equipo de empalme por arco eléctrico y en la figura IV.4b se tiene el proceso del empalme, las fibras se sujetan a los canales en "V" mediante el uso de una bomba de vacío. Una vez realizado el empalme se protege con un refuerzo mecánico y una envolvente plástica.

### Empalme por fusión por combustión de gases.

En esta técnica se realiza la fusión de las fibras por medio de una microflama proveniente de la combustión de gases: oxígeno y propano. Este tipo de empalme presenta pérdidas de menos de 0.1 dB.

Los dos tipos de empalme anteriores requieren de trabajo previo y posterior al proceso de fusión, como son la preparación de las superficies en los extremos y la protección final del empalme.

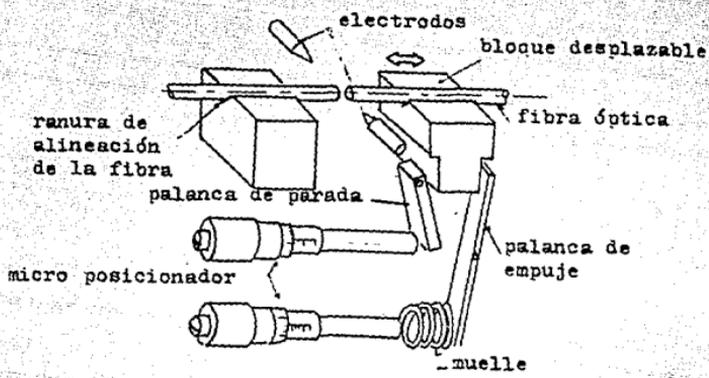


Fig. IV.4a Representación esquemática de un empalme por fusión mediante un arco eléctrico.

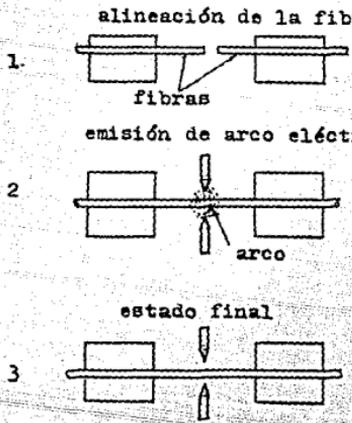


Fig. IV.4b Proceso de empalme

### Empalme por acoplamiento mecánico

Este tipo de empalme se usa comunmente en cables de gran capacidad de fibras (10 o más), se utiliza para cables con elemento cilíndrico ranurado, se necesita reproducir una pieza de precisión a la estructura geométrica del elemento central del cable. Por lo tanto, se requiere la preparación de ambos extremos del cable óptico. Las fibras se colocan en las guías de precisión y se sujetan en ranuras con cinta elástica, posteriormente las fibras se pegan. Las piezas se juntan con un sistema mecánico de posicionamiento que impide la posibilidad de rotación en las extremidades. Este tipo de empalme es muy laborioso y presenta mayor complejidad al realizarse en torres elevadas.

### CONECTORES

Para la elección de un conector óptico deben considerarse los siguientes parámetros:

Baja pérdida por inserción.

Facilidad de construcción y montaje.

Compatibilidad con diferentes muestras del mismo conector.

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

Bajo costo.

Los conectores se dividen según su principio de operación en: a) Conectores de guía metálica con joya de reloj, b) Conectores ranurados y c) Conectores de otros tipos.

a) Conectores de guía metálica con joya de reloj.

Es el tipo más común, utiliza una joya de reloj montada en el extremo de una guía metálica. De la precisión con que se centra el orificio de la joya de reloj con respecto a la guía, depende la precisión del conector (figura IV.5 ). El procedimiento es el siguiente:

i) Colocación de la fibra óptica en la guía metálica.

En una sección de longitud específica se separan las cubiertas plásticas del extremo de una fibra óptica. La fibra desnuda se introduce en el orificio de la joya de reloj y se le une con resina epóxica.

ii) Pulido.

Se corta la fibra dejando un pequeño exceso el cual se pulle con abrasiones que van desde 30  $\mu\text{m}$  hasta 0.3  $\mu\text{m}$ .

iii) Las terminaciones se introducen en una guía externa para alineación en un proceso manual que permite la conexión y desconexión.

Las características típicas de este conector son:

Baja pérdida: < 1.0 dB (0.5 dB valor típico)

Alta pérdida: < 4.0 dB (2.0 dB valor típico)

Capacidad de conexión y desconexión: 500 maniobras

Rango de utilización:  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$

Se tienen tres diferentes diámetros para la joya de reloj de: 50/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , 200/280  $\mu\text{m}$ .

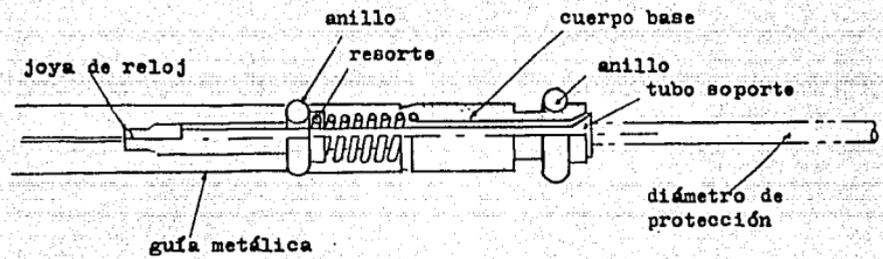


Figura IV.5 Conector con terminación en guía metálica y joya de reloj.

b) Conectores ranurados.

Es un conector con una precisión de  $1\ \mu\text{m}$ , este tipo se muestra en la figura IV.6. La fibra óptica se contiene en una pieza en forma de cuña. El extremo saliente se corta y se pule y las piezas terminadas se unen en una tercera ranurada en "V" que permite la conexión, las pérdidas en este conector son de 0.7 dB

Los valores típicos son:

Pérdida por inserción:

Baja pérdida: 0.5 dB.

Alta pérdida: 0.7 dB.

Capacidad de conexión y desconexión: 500 maniobras.

Rango de utilización  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+30^{\circ}\text{C}$ .

c) Otro tipo de conectores.

Tubos en guía de presión.

Constan de un adaptador formado por una guía metálica que presiona dos tubos de diámetro ligeramente distinto, permitiendo así la fijación y alineamiento de las fibras, estas se montan en los tubos y se terminan de manera similar a la de los conectores de guía metálica con joya de reloj, sus ventajas son la rapidez de montaje y la reducida atenuación de menos de 0.4 dB.

Esfera de alineamiento.

Utiliza una pequeña esfera, dentro de la cual se unen los extremos de las fibras ópticas, se necesita un instrumento óptico para fijar los ejes de la fibra y la esfera, mediante un ajuste mecánico, para lograr la mínima pérdida por inserción - que es menor de 0.5 dB.

En la instalación de sistemas de comunicación por fibras ópticas debe contarse con la facilidad de hacer conexiones, a diferencia de los empalmes, los conectores se usan en los extremos terminales de las fibras para acoplarse con el equipo de comunicación o de medición.

La conexión fuente-fibra y fibra-detector no representa problemas para el usuario, ya que las componentes optoelectrónicas de los equipos vienen provistas con una terminal de conexión únicamente debe asegurarse la compatibilidad entre los conectores.

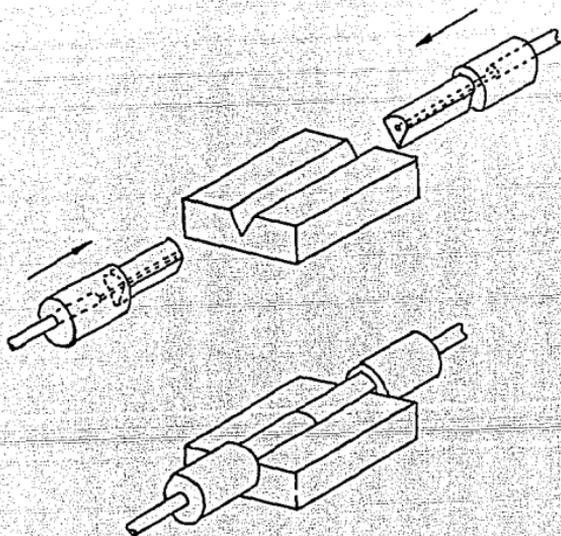


Figura IV.6 Proceso conector ranurado en 'V'

## CAPITULO V

### FOTODETECTORES.

La función de los fotodetectores es convertir la señal luminosa, a la entrada del receptor, en una señal equivalente.

Se requiere lo siguiente para obtener la detección:

- 1.- Alta respuesta a la energía incidente.
- 2.- Alta velocidad de respuesta, para el ancho de banda de la información en la portadora óptica.
- 3.- Ruido mínimo introducido por el detector óptico.
- 4.- Baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

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

Hay varios tipos de dispositivos que cumplen este objetivo pero el que se usa para fibras ópticas es el fotodiodo semiconductor de silicio, ya que las dimensiones de este fotodetector son compatibles con las de la fibra óptica y además presentan buena respuesta al rango de longitudes de onda utilizado actualmente ( 0.8 a 0.9  $\mu\text{m}$  aprox.). Los fotodiodos semiconductores se clasifican en dos tipos: el fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha. Esta clasificación se hace de acuerdo a la ganancia interna. Para el diodo PIN la ganancia es unitaria y pa

ra el de avalancha es mayor que uno, usualmente entre 10 y 100.

#### POTODETECTORES TIPO PIN.

Si se tiene una unión p-n polarizada inversamente, se forma una barrera de potencial y una región de agotamiento (fig. V.1a). Si, al incidir la luz se genera un par electrón-hueco en la región de agotamiento, o sea, de alto campo, los portadores se separan y son atraídos por el electrodo de polaridad opuesta, originando una corriente y por lo tanto, un voltaje en la resistencia de carga externa.

Si el par electrón-hueco se produce en la región de difusión entonces los portadores serán colectados mediante un proceso lento. Para evitar este retardo se introduce una capa semiconductor ligeramente contaminada con impurezas de material n, esta capa se conoce como intrínseca, con lo que se introduce la región de difusión y se aumenta la de agotamiento o de alto campo, como se vé en la figura V.1b.

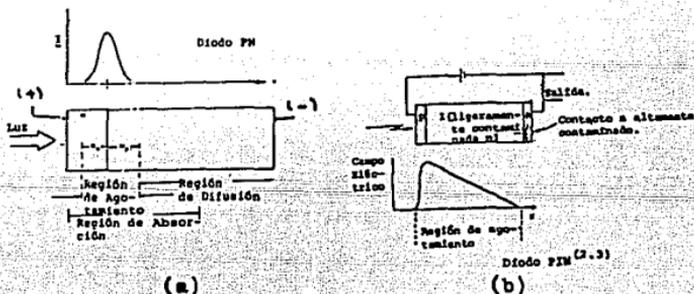


Figura V.1

En la figura V.2 se presenta físicamente un fotodiodo PIN donde puede verse que para aumentar el rendimiento del fotodetector, se incluye una cubierta antirreflejante a la entrada luminosa y en el extremo opuesto un metal o espejo para reflexión.

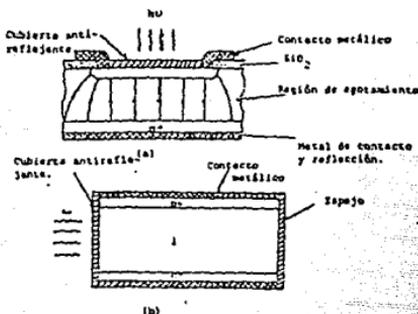


Fig.V.2 Estructura de los fotodiodos PIN de silicio iluminado de frente y (b) PIN iluminado lateralmente

En el funcionamiento de los fotodetectores tipo PIN se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

a) Eficiencia cuántica  $\eta$ : Es la razón del número de pares electrón-hueco generados y el número de fotones incidentes.

b) Responsividad  $R_o$ : Es la razón de la corriente eléctrica producida y la potencia óptica incidente (amperes/watt).

Para un fotodiodo PIN, la corriente generada está dada por

$$i_o = R_o P$$

$$R_o = \frac{h q}{h \nu}$$

Siendo :

$i_o$  la corriente generada en el fotodetector en amperes.

$R_o$  es la responsividad.

$P$  es la potencia óptica en watts.

$\lambda$  es la eficiencia cuántica.

$q$  es la carga del electrón:  $1.6 \times 10^{-19}$  Coulombs.

$h$  es la constante de Planck:  $6.62 \times 10^{-34}$  Joules\*seg.

$\nu$  es la frecuencia de la luz incidente en Hertz.

En los fotodiodos PIN hay una gran discrepancia entre la eficiencia cuántica, que requiere de una amplia zona intrínseca y una alta velocidad de respuesta, que requiere de una región intrínseca reducida.

#### FOTODIODO DE AVALANCHA (APD).

Los niveles de potencia óptica que recibe un fotodetector son muy bajos, por lo que los niveles de corriente generada son del orden de nanoamperes, por lo que son susceptibles al ruido. Una forma de aumentar el nivel de la señal antes de que se enfrente a fuentes de ruido térmico del circuito de polarización y amplificación, es incrementando la ganancia interna del fotodiodo.

En el fotodiodo de avalancha se generan pares hueco-electrón de la misma manera que en el PIN, sin embargo estos pares se multiplican por una ganancia  $M_a$  siendo esta una variable aleatoria. Esta multiplicación se debe a colisiones sucesivas en las que un portador genera nuevos portadores (figura V.3).

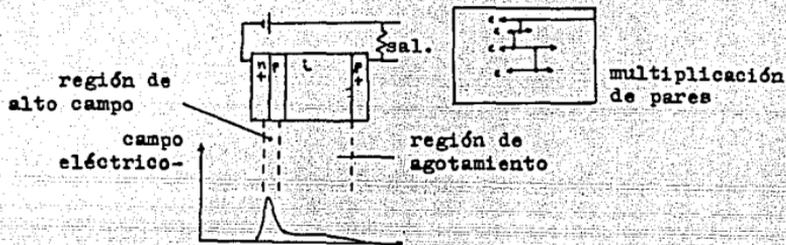


Figura V.3 Fotodiodo de avalancha.

En este caso los pares electrón-hueco se generan en la región de agotamiento, fuera de la de alto campo y cuando son atraídos a esta última, se producen las colisiones que generan la multiplicación a avalancha autosostenida de portadores. La ganancia del fotodiodo de avalancha es aleatoria y aunque se toma un valor medio, tiene variaciones grandes debidas al ruido en la señal. Esta es la principal desventaja del fotodiodo de avalancha.

En la figura V.4 se representan dos variantes de la estructura de un fotodiodo de avalancha, la estructura de los diodos APD por lo general incluyen un "anillo de guardia", el propósito de este elemento es prevenir los voltajes bajos de ruptura y fuga excesiva en las orillas de la unión por medio de la reducción del campo en esas regiones.

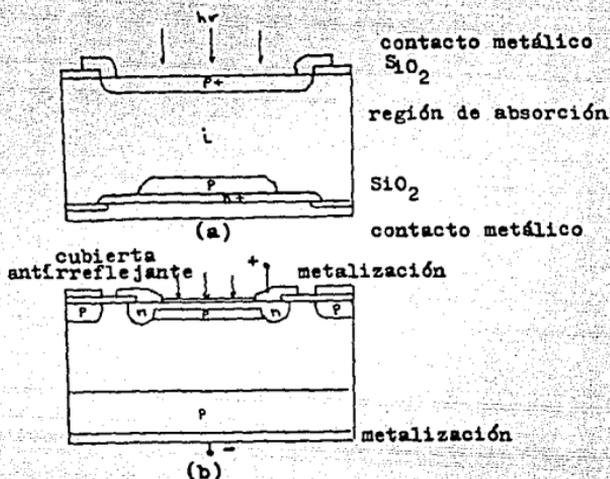


Figura V.4 Estructura de un fotodiodo de avalancha de silicio (a) de alcance, (b) epitaxial

#### CONSIDERACIONES DE RUIDO.

El ruido en los fotodetectores se debe principalmente al comportamiento estadístico asociado con el proceso de detección o generación de portadores y la ganancia ( en el caso del APD). También la corriente de oscuridad contribuye con este ruido y se define a continuación:

**Corriente de oscuridad.** Es la corriente que fluye en el fotodiodo semiconductor y que no depende de la potencia óptica incidente.

El ruido dominante en un diodo es el ruido cuántico o de disparo que depende de la corriente promedio  $I_0$  y del ancho de banda de la señal  $\Delta f$ .

$$\langle i_{sh}^2 \rangle = 2qI_0 \Delta f$$

Donde:  $I_0$  es la corriente en el fotodetector.

$q$  es la carga del electrón.

$\langle i_{sh}^2 \rangle$  es el valor cuadrático medio de la corriente de ruido.

$\Delta f$  es el ancho de banda de la señal.

Potencia equivalente de ruido (NEP). Para un fotodiodo, la relación señal a ruido puede expresarse en función de la potencia óptica de entrada. Si la relación señal a ruido se hace unitaria entonces puede calcularse la potencia óptica equivalente a esta relación.

En el caso de un fotodiodo de avalancha, esta relación señal a ruido depende también de la ganancia y existe por lo tanto, un valor de la ganancia que minimiza la potencia equivalente del ruido.

#### EFEECTO DE TEMPERATURA EN GANANCIA DE AVALANCHA.

El mecanismo de la ganancia en un fotodiodo de avalancha es muy sensible a la temperatura. Esta dependencia de la temperatura es particularmente crítica en altos voltajes de alimentación del fotodiodo, donde pequeños cambios de temperatura provocan grandes variaciones en la ganancia. Si la temperatura de operación decrece y el voltaje de alimentación permanece constante, los rangos de ionización para electrones y huecos se incrementa del mismo modo que la ganancia de avalancha.

Para mantener constante la ganancia a los cambios de temperatura, el campo eléctrico en la región de multiplicación de la juntura p-n debe también cambiar. Esto requiere que se in-

corpore en el receptor un circuito de compensación, el cual -  
ajusta el voltaje de alimentación del fotodetector cuando la  
temperatura cambia.

## CAPITULO VI.

### RECEPTORES OPTICOS.

#### FUNDAMENTOS EN RECEPTORES OPTICOS.

La elección de los sistemas ópticos en los sistemas de comunicación por fibra óptica, es de gran importancia ya que de las características de este, depende el espaciamiento entre repetidores o la máxima separación entre equipos terminales.

La función del receptor es detectar la señal de luz que incide en la superficie del fotodetector y convertirla en una señal eléctrica que contenga la información transmitida. La conversión fotoeléctrica realizada por el fotodetector se ve afectada por el mismo, por el amplificador u otros circuitos que le sigan.

#### CONFIGURACION DE LOS RECEPTORES.

Los receptores ópticos están constituidos esencialmente - por (fig.VI.1):

- 1.- Fotodetector.
- 2.- Etapas de amplificación.
- 3.- Filtro.

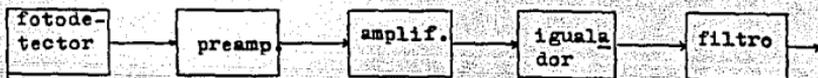


Fig.VI.1 Esquema básico del receptor óptico.

El objetivo fundamental en el diseño de un receptor óptico es minimizar la potencia óptica que se requiere en la entrada para una determinada relación señal a ruido, en sistemas analógicos; o una determinada probabilidad de error en sistemas digitales.

El fotodetector es el transductor de entrada y convierte la potencia incidente en una señal eléctrica débil. Como ya vimos, en sistemas de comunicación por fibras ópticas se utilizan los fotodiodos semiconductores tipo PIN y de avalancha (APD), de los que describimos el principio físico de su funcionamiento. Para propósitos de receptores, observaremos su comportamiento circuital y estadístico.

El circuito equivalente de un fotodiodo es el mostrado en la figura VI.2 en el que  $i_o$  es la fuente de corriente;  $C_d$  es la capacitancia de agotamiento de la unión;  $R_L$  es la resistencia del circuito de polarización. La capacitancia de agotamiento se produce a causa de la polarización inversa del diodo.

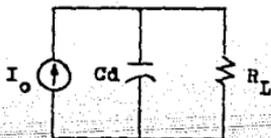


Fig.VI.2 Circuito equivalente del fotodiodo

La corriente  $i_o$  generada en un fotodiodo PIN esta dada por la relación:

$$i_o = R_o P$$

$$R_o = \frac{h\nu}{h\nu}$$

como vimos en el capítulo anterior.

Para el caso del fotodiodo de avalancha la relación anterior se multiplica por el valor medio de la ganancia interna (que es una variable aleatoria):

$$i = \langle M \rangle i_o$$

siendo:  $\langle M \rangle$  el valor medio de la ganancia interna del diodo.

$i$  la corriente producida en el fotodiodo de avalancha

$i_o$  la corriente primaria producida.

En el caso de receptores ópticos se tienen básicamente dos etapas de amplificación: preamplificación y postamplificación. La corriente a la salida del fotodetector es muy baja, debido a que la potencia incidente es baja también, esta corriente producida deberá enfrentarse a las fuentes de ruido de disparo que causa la generación de portadores en los semiconductores. Por esto se introduce un amplificador de bajo ruido, el postamplificador se supone intrínsecamente de bajo ruido.

La función del filtro es de minimizar el ruido. El valor del ruido depende, entre otras cosas, de la función de transferencia del receptor, por lo que considerando las funciones de transferencia del fotodetector, preamplificador, y postamplificador se puede agregar un filtro cuya función de transferencia reduce la posibilidad de ruido..

### RUIDO EN RECEPTORES OPTICOS.

A continuación se describen las principales fuentes de ruido que afectan al receptor óptico.

Ruido en la señal: Para una señal digital, el valor de la amplitud de un pulso que se hace pasar a través de un circuito con una función de transferencia determinada, está sobre un valor medio y la varianza de la señal sobre este nivel se interpreta como ruido.

Interferencia entre símbolos: Para una señal digital, en la que se transmite una secuencia de pulsos, estos pueden llegar a traslaparse e introducir errores debido a la dispersión en la fibra óptica (fig.VI.3).

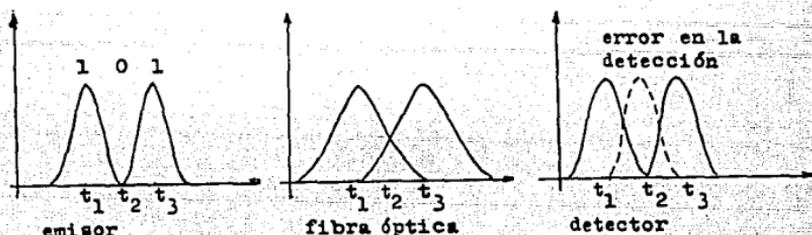


Fig.VI.3 Interferencia entre símbolos.

Ruido de disparo cuántico: Se produce por la naturaleza estadística de la conversión de fotones a portadores en el detector. El ruido de disparo puede representarse por una fuente de corrientes (fig.VI.4) cuyo valor cuadrático medio está dado por:  $\langle I_{sh}^2 \rangle = 2qI_0 \Delta f$  (ver capítulo anterior), por ejemplo: para  $I_0 = 10$  namp. y  $\Delta f = 100$  KHz :  $\langle I_{sh}^2 \rangle = 0.018$  namp.

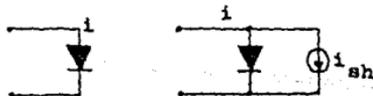


Fig.VI.4 Ruido cuántico

Ruido térmico: Es el producido por la agitación térmica de los portadores de carga en los dispositivos electrónicos. El ruido térmico o ruido Johnson de un resistor R puede representarse por una fuente de corrientes ( fig.VI.5), con un valor cuadrático medio de:

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4q}{R} V_t f$$

Donde:  $V_t = KT/q$

siendo K la constante de Boltzman

T la temperatura en grados Kelvin.

Si:  $T = 300^\circ K$  entonces  $V_t = 0.025$  volts; Para  $R = 1$  Mohm y  $f = 100$  KHz se tienen :  $\langle I_{th}^2 \rangle = 0.04$  namp.

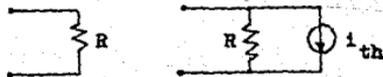


Fig.VI.5 Ruido térmico

**Corriente de oscuridad:** Es la que se produce en el detector la cual no depende de la señal óptica incidente, pero se agrega a la señal como ruido.

**Factor de ruido en exceso:** En los fotodiodos de avalancha la generación de portadores se vé multiplicada por la ganancia del dispositivo, que es una variable aleatoria sobre un valor medio. Sin embargo, esto es afectado por los mecanismos de degradación que dan como resultado un factor de ruido en exceso por el proceso de multiplicación.

**Sensitividad y análisis de ruido en receptores ópticos.**

Un análisis completo de ruido en receptores ópticos, para determinar la sensibilidad de los mismos, tanto en modulación analógica como digital, queda fuera del alcance de este trabajo debido a la extensión y complejidad del tratamiento teórico, el cual involucra aspectos de estadística, circuitos y técnicas de computación. Para mayor información consultar la referencia bibliográfica no. 2.

A continuación se presenta una breve descripción de los receptores ópticos:

El valor total del ruido en un receptor óptico está dado (también en valor cuadrático medio) por la expresión:

$$\langle n_{\text{tot}}^2 \rangle = \langle n_s^2(0) \rangle + \langle n_d^2 \rangle + \langle n_c^2 \rangle$$

Siendo:  $n_s^2(0)$  el peor caso de interferencia entre símbolos.

$n_d^2$  es el ruido por corriente de oscuridad.

$n_c^2$  es el ruido del circuito (ruido térmico y de disipación).

Es muy importante el tipo de preamplificador que se va a utilizar; Hay tres tipos básicos que son: Amplificador FET, amplificador BJT y amplificador de transimpedancia (FET o BJT) los que se representan en la figura VI.6. Cada uno conviene en algún caso particular, en bajas frecuencias se recomienda usar el FET ya que sus fuentes internas de ruido aparecen en altas frecuencias, esto sucede al contrario en el BJT. En ocasiones se desea un rango dinámico más amplio, por lo que se utiliza un amplificador de transimpedancia.

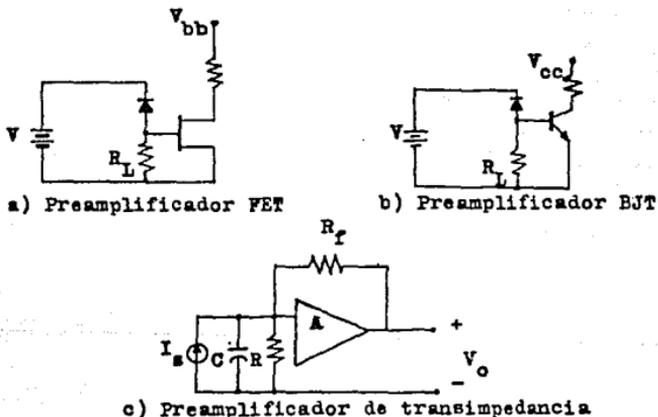
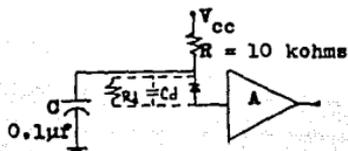


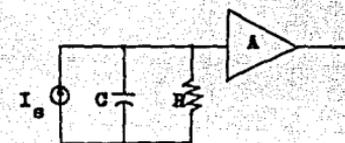
Fig.VI.6 Representación esquemática de los diferentes preamplificadores que se utilizan en un receptor óptico

Receptor de transimpedancia.

En la figura VI.7a se muestra un circuito receptor elemental. El fotodiodo polarizado en inversa alimenta a un amplificador de bajo ruido con elevada impedancia de entrada,  $C_d$  es la capacitancia interna del fotodiodo (del orden de 5 pfd) y  $R_d$  la resistencia interna (del orden de Mohms). En el circuito, de la figura VI.7b se llama  $C$  a las capacitancias del amplificador y del fotodiodo.



a) Circuito D.C.



b) Circuito A.C.

Fig.VI.7 Fotodetector y circuito elemental

Para obtener un ancho de banda adecuado en el receptor  $(B_T)$ , la constante de tiempo  $\tau$  del circuito de entrada debe ser suficientemente pequeña, para un circuito RC:  $\tau = RC$

$$B_T = \frac{1}{2\pi RC}$$

Si la capacitancia total del circuito disminuye a un valor medio que  $C_d$ , la constante de tiempo sería  $R_d C_d$ , la cual daría lugar a un ancho de banda muy grande, con lo que se tiene la necesidad de introducir una resistencia de carga  $R$  con valor muy inferior al de  $R_d$ , sin embargo, con lo anterior se introduce ruido térmico en exceso, en suma:

$R$  baja = ancho de banda suficiente.

$R$  alta = bajo ruido térmico.

Para solucionar el dilema anterior se utiliza el amplificador de transimpedancia, que utiliza una resistencia de realimentación para incrementar el ancho de banda, sacrificando ganancia. La constante de tiempo está afectada por el factor de amplificación:

$$\tau = \frac{R_f C}{A}$$

resultando el ancho de banda:

$$B_r = \frac{A}{2\pi R_f C}$$

El amplificador de transimpedancia se ha usado trabajando con frecuencias tan altas como 400 MHz. Aunque la mayor desventaja de este amplificador es el límite del valor de la resistencia  $R_f$  para minimizar su ruido térmico, es muy usado debido a su simplicidad. En la figura VI.8 se representa un circuito receptor de transimpedancia.

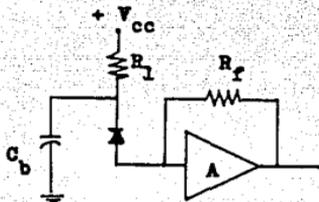
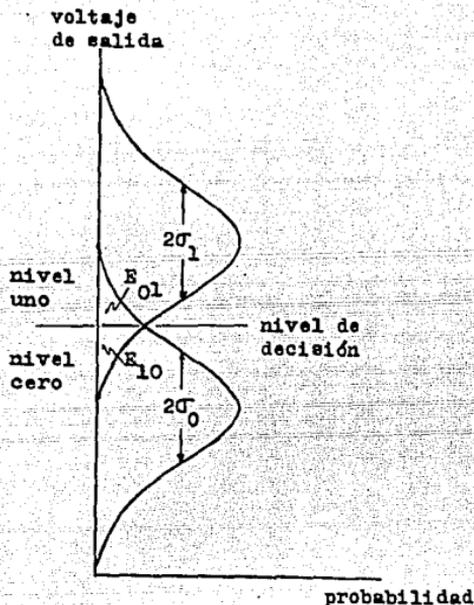


Fig.VI.8 Circuito receptor de transimpedancia

#### RECEPTORES DIGITALES.

En sistemas digitales la información se transmite como una serie de pulsos y espacios que ocurren a una velocidad  $B$ . En el receptor la señal llega atenuada y distorsionada. La función del regenerador es determinar si se transmitió un pulso o un espacio y regenerar la información con una mínima probabilidad de error. La probabilidad de error está dada por la razón del número de bits identificados incorrectamente, al número  $n$  tal de bits transmitidos. En aplicaciones de fibra óptica la probabilidad de error (BER) =  $10^{-9}$ .

Los pulsos luminosos a la salida del transmisor consisten en dos niveles bien definidos, pero esto no sucede en el receptor y los niveles pueden caracterizarse en términos de una función de densidad de probabilidad (PDF). Esta función de densidad de probabilidad describe la posibilidad de que el voltaje de salida tenga un valor  $V$  contenido en un rango incremental



$E_{01}$ : Probabilidad de identificar un espacio incorrectamente.

$E_{10}$ : Probabilidad de identificar un pulso incorrectamente.

$\sigma_0$  y  $\sigma_1$ : Niveles de ruido asociado con los niveles de la señal.

Fig.VI.9 Función de distribución de probabilidad para una señal digital de dos niveles.

dV. En la figura VI.9 se indica la forma que puede tomar dicha PDP.

#### RECEPTORES ANALOGICOS.

El funcionamiento del receptor, en el caso de sistemas - analógicos se expresa en términos de la relación señal a ruido o relación portadora a ruido. La potencia óptica es modulada por una onda sinusoidal de modo que:

$$p(t) = P_t (1 + m \text{ sen } wt)$$

Donde:  $P_t$  es la potencia transmitida promedio.

$m$  es el índice de modulación.

$w$  es la frecuencia de modulación.

Para un medio de transmisión no dispersivo la potencia óptica tendrá la misma forma en el receptor que la ecuación anterior. La corriente fotogenerada en el receptor (detector) estará dada por:

$$I = I_o \langle M \rangle (1 + \text{sen } wt)$$

Donde:  $I_o = \frac{hq}{hv} P_r$

y  $\langle M \rangle$  es la ganancia de avalancha promedio, para un detector PIN:  $\langle M \rangle = 1$ .

El ruido promedio total en el sistema, incluyendo el ruido de disparo asociado con la señal está dado por:

$$\langle i^2 \rangle = \langle i_c^2 \rangle + 2qI_o \langle M^2 \rangle F(\langle M \rangle) B_{\text{eff}}$$

Donde:  $B_{\text{eff}}$  es el ancho de banda efectivo de ruido del sistema y  $F(\langle M \rangle)$  es el factor de ruido en exceso en el fotodiodo  $\approx M^x$  ( $0 < x \leq 1$ ).

La relación señal a ruido (S/N) definida en términos de la relación del valor cuadrático medio de la corriente de la señal al valor cuadrático medio de la corriente de ruido, está dada por:

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{2} \frac{m^2 \langle M^2 \rangle I_0^2}{\langle i_c^2 \rangle + 2qI_0 \langle M^2 \rangle F(\langle M \rangle) B_{eff}} \quad \text{APD}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{2} \frac{m^2 I_0^2}{\langle i_c^2 \rangle + 2qI_0 B_{eff}} \quad \text{PIN}$$

Con un APD el ruido se incrementa rápidamente con  $\langle M \rangle$  y la relación S/N se reduce para cualquier valor de  $\langle M \rangle \gg 1$ . Por lo anterior se deduce que para relaciones S/N altas se utilizará preferentemente el detector PIN y para relaciones S/N bajas como en sistemas digitales, es más conveniente el uso de detectores APD. Las ecuaciones expuestas anteriormente fueron tomadas de la referencia bibliográfica no. 1 .

#### REPETIDORES OPTICOS.

Los repetidores ópticos tienen como función regenerar adecuadamente la señal en puntos intermedios de una línea de transmisión larga. El proceso de regeneración se lleva a cabo en tres pasos:

- Amplificación e igualación de la forma de onda de la señal.
- Recuperación de la señal de sincronismo del tren de pulsos ( en comunicación digital).
- Detección sincrónica y retransmisión de la señal.

En la figura VI.10 se muestra el esquema básico de un repetidor óptico. La distancia entre repetidores está limitada por la atenuación y dispersión, que dependen de las características de la transmisión del enlace y parámetros de las fibras.

La utilización de repetidores en un sistema de comunicación por fibras ópticas requiere la adecuada alimentación de dichos dispositivos, sobre todo cuando los repetidores quedan instalados en zonas aisladas y de difícil acceso. Típicamente la potencia requerida para alimentar a un repetidor óptico es menor a 20 watts. Por lo que las fuentes de energía utilizadas son las siguientes:

- 1.- Generador termoeléctrico.
- 2.- Celdas solares.
- 3.- Alimentación a través de conductores metálicos.
- 4.- Batería recargable.

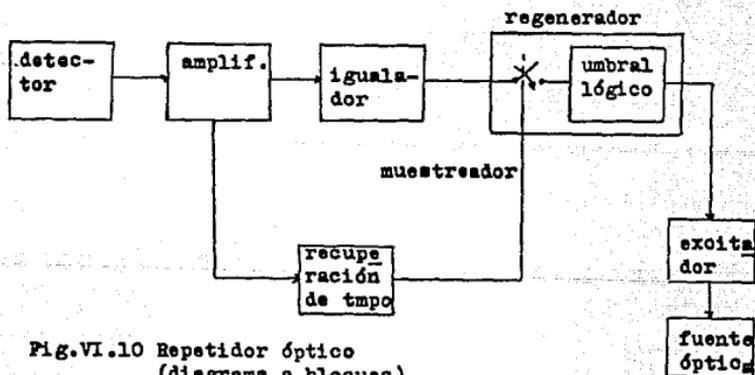


Fig.VI.10 Repetidor óptico  
(diagrama a bloques)

## CAPITULO VII.

### CABLES DE FIBRAS OPTICAS Y FABRICACION.

#### CARACTERISTICAS PARA EL DISEÑO DE CABLE OPTICO.

Las características del material de las fibras ópticas - permiten que las fuerzas radiales, axiales y los momentos flexionantes, produzcan fenómenos que pueden traducirse en atenuación de la señal óptica y por lo tanto, en una disminución de la calidad de transmisión. Por otro lado, al someter a una fibra a condiciones de tensión y en presencia de un ambiente húmedo, se genera un proceso de envejecimiento que dá como resultado la ruptura de la fibra óptica en corto plazo (fatiga estática).

Por lo anterior, debe procurarse aislar a las fibras de - esfuerzos innecesarios, para evitar lo más posible las deformaciones en las mismas. Analicemos las propiedades ópticas y mecánicas de las fibras ópticas que influyen en la atenuación y su tiempo de vida.

Existen dos fenómenos interrelacionados con las curvaturas del eje de la fibra que producen perturbaciones en la propagación de la potencia óptica: El radio de curvatura o curvatura continua y las microcurvaturas o microdesviaciones.

El radio de curvatura se presenta como consecuencia de esfuerzos de compresión sobre la fibra, produciendo un decreci-

miento exponencial de la potencia óptica de acuerdo con la siguiente ecuación ( ref. no. 4);

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \frac{A e^{(-\beta R)}}{R}$$

Siendo  $A$  = constante que depende del tipo de fibra óptica usada.

$P_1$  = potencia óptica.

$\beta$  = constante de propagación del modo.

$R$  = radio de curvatura.

El valor máximo del radio de curvatura oscila entre 50 y 60 mm. Las microcurvaturas se deben a esfuerzos de elongación cuando la fibra se apoya sobre una superficie rugosa; Esto genera un acoplamiento de potencia entre los modos guiados, produciendo cierta pérdida en función de la distancia. Para fibra de índice gradual se debe trabajar con un rango menor de 100 defectos por metro, de modo que las pérdidas no afecten al sistema de comunicación.

El eje óptico de la fibra sigue una curvatura periódica con un radio que depende de la presión con que la fibra se apoya en los defectos, en la figura VII.1 se muestra el comportamiento de la fibra óptica ante este fenómeno.

Las microcurvaturas se pueden analizar a partir de la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{12 EI}{m \cdot \Delta^2} \quad (\text{ref. no. 3})$$

Siendo:  $R_m$  = radio de microcurvatura.  
 $E$  = módulo de elasticidad de la fibra.  
 $I$  = momento de inercia de la fibra.  
 $M_p$  = momento con el cual la fibra se apoya en la superficie.  
 $n_1 - n_2$  = diferencia relativa de los índices de refracción.

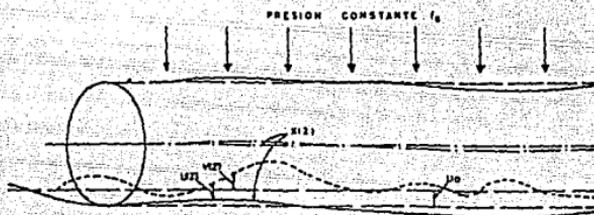


Fig.VII.1 FIBRA PRESIONADA CONTRA UNA SUPERFICIE RUGOSA

El rango de variación de  $R_m$  es de 4 a 30 mm, lo cual puede producir atenuaciones considerables en la señal óptica. Por esto, se han modificado algunos parámetros de la fibra o del cable, para minimizar la diferencia de dichas microcurvaturas;

- Disminución del diámetro del núcleo de la fibra, para reducir el coeficiente de atenuación.
- Incremento del diámetro de la cubierta de la fibra, para aumentar la capacidad de soportar tensiones mayores antes de que aparezcan microcurvaturas.

- Eliminación de la tensión de la fibra en el cable a través del diseño adecuado de la estructura del cable óptico. En la gráfica de la figura VII.2 se representan los niveles de atenuación que producen los radios de curvatura descritos.

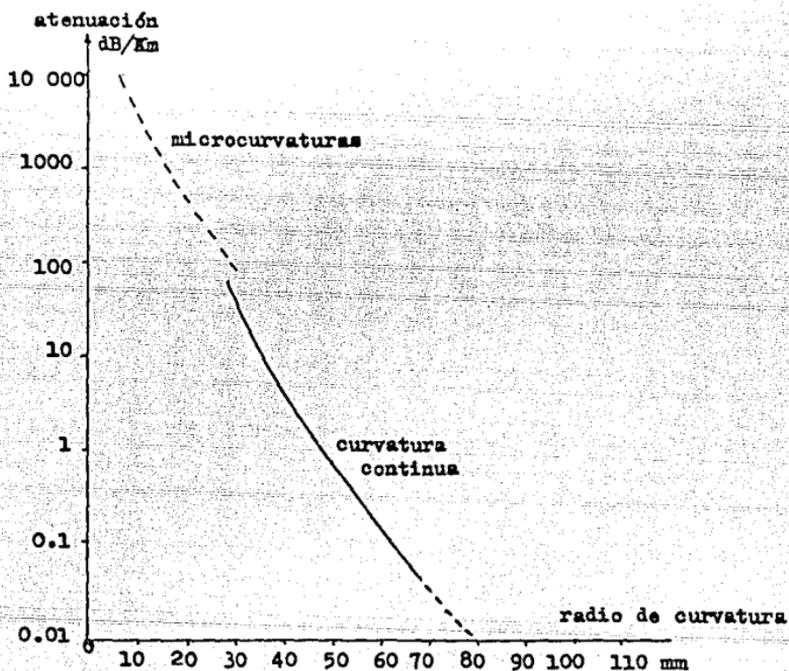


Fig.VII.2 Atenuación en exceso en función del radio de curvatura

Los esfuerzos de tensión a que se someten las fibras ópticas se aumentan al existir "microfracturas", que se encuentran distribuidas aleatoriamente a lo largo de la fibra, en forma superficial o interna. Los esfuerzos de tensión se concentran en las microfracturas, propagándose cuando el esfuerzo toma valores cercanos al límite de ruptura del material. Por esto la resistencia mecánica de las fibras se reduce considerablemente. La probabilidad de ruptura en función del esfuerzo aplicado puede ser determinada usando la ecuación siguiente:

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp \left[ -L (\sigma/\sigma_0)^m \right]$$

Donde: m = pendiente de la gráfica de distribución de defectos.

$\sigma_0$  = tensión inicial sobre la fibra óptica.

$\sigma$  = tensión de ruptura.

L = longitud de la fibra óptica.

En la gráfica de la figura VII.3 se muestra la probabilidad de ruptura en función del esfuerzo de tensión.

Se debe tener cuidado durante los procesos de fabricación e instalación de las fibras ópticas, colocando a estas las protecciones plásticas y metálicas necesarias, de modo que el tiempo de vida útil del cable resulte lo más grande posible, ante la influencia del medio ambiente.

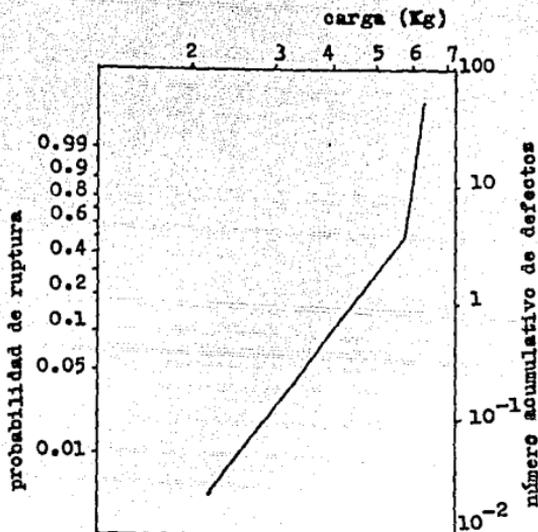


Fig.VII.3 Probabilidad de ruptura en función del esfuerzo de tensión

#### ESTRUCTURA DEL CABLE OPTICO.

Las estructuras del cable óptico pueden clasificarse en dos grupos, dependiendo de la forma en que afectan al comportamiento de la fibra óptica, a continuación describiremos estos grupos:

- 1.- Estructuras densas, con la fibra inmersa en el material plástico.
- 2.- Estructuras libres, con soporte alveolar que evita los problemas de curvaturas y microcurvaturas en las fibras ópticas.

Las estructuras densas se dividen en trenzadas y de cintas densas.

Las estructuras densas trenzadas utilizan uno o más recubrimientos plásticos como refuerzos y protección para la fibra óptica antes de ensamblarla en grupos o capas. En la figura - VII.4 se muestra un cable de estructura densa monofibra de tres capas, con un recubrimiento primario fino, sobre este se coloca una capa de resina de silicón con bajo módulo de elasticidad, finalmente se recubre con nylon para darle consistencia a la estructura. El silicón permite absorber las deformaciones de la fibra óptica producidas por la tensión del trenzado, las rugosidades resultantes de la fabricación del cable y los efectos térmicos. Este cable resulta de tamaño reducido, pero presenta gran susceptibilidad a la compresión lateral, por lo que se debe manejar con cuidado.

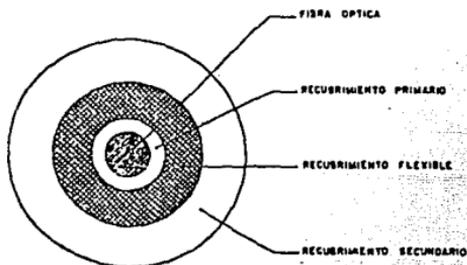


Fig.VII.4 FIBRA OPTICA DE TRES CAPAS

Las estructuras de cintas densas, manejan un gran número de fibras por cable, reunidas en una matriz enrollada en forma espiral para que el cable soporte los radios de curvatura a los que se someta; La figura VII.5 muestra una estructura con 144 fibras con recubrimiento primario de 0.25 mm de diámetro; cada cinta contiene 12 fibras, en una matriz de 25 mm<sup>2</sup>. Esta matriz esta recubierta por una capa de polietileno de alta densidad de 12 mm de diámetro.

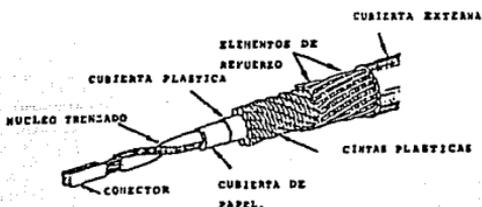


Fig.VII.5 Cable óptico que contiene 144 fibras

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

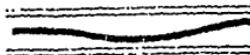
Este tipo de estructuras permite un margen de elongación a la fibra óptica contenida en un tubo de plástico. Dentro de este tubo la fibra óptica esta libre de esfuerzos, de esta forma cuando la fibra, que presenta cierta ondulación, recibe una tensión, puede tomar una posición casi recta, pero si dicha tensión rebasa los límites de elongación de la fibra, esta se somete a esfuerzos de tensión que provocan pérdidas por micro-

curvaturas. Por lo anterior el cable debe tener un tiempo de tendido bajo, para no someter a las fibras a esfuerzos de tensión por mucho tiempo.

Por el contrario cuando los materiales plásticos de los tubos se contraen por enfriamiento, la hélice de la fibra se acorta, generando pérdidas por doblamientos periódicos. En la figura VII.6 se observa el modo como suceden los fenómenos anteriores.



a)  
Fibra óptica en el tubo  
después del cableado



b)  
Disminución de la longitud en  
exceso por esfuerzos sobre  
el tubo durante la tensión.



c)  
Incremento de la longitud en  
exceso por enfriamiento  
del tubo durante enfriamiento

**Fig.VII.6 Fibras ópticas en estructuras  
de tubos libres**

Las estructuras de cintas con fibras libres constan de una cinta con cinco alvéolos en forma exagonal. El cable óptico se construye termosellando dos bandas de aluminio cubiertas por una película de polietileno en sus caras opuestas, se acoplan en grupos de 10 y se envuelven con dos cintas protectoras, y un refuerzo plástico y se enrollan en una espiral. Esta estructura tiene ventajas sobre la afectividad de esfuerzos mecánicos, en comparación con las estructuras de cintas densas ( ver figura VII.7)

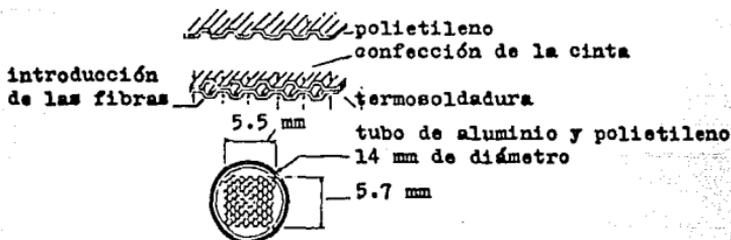
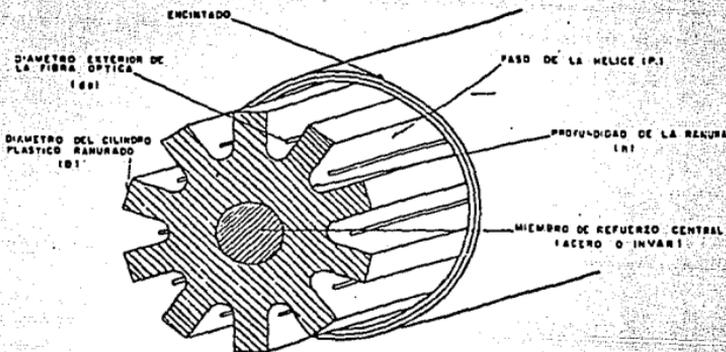


Fig.VII.7. Estructura de cintas con fibras libres.

La estructura cilíndrica ranurada es la mostrada en la figura VII.8 esta consta de un cilindro ranurado en "V", en las ranuras se alojan libremente las fibras ópticas con un recubrimiento primario, dichas ranuras están dispuestas en espiral, para permitir mayor holgura a las fibras librándolas de esfuerzos mecánicos. El cilindro ranurado está reforzado por un miembro central. Con esta estructura se obtiene un mejor comportamiento térmico y mecánico del cable.



**Fig.VII.8** ESTRUCTURA CILINDRICA RANURADA EN "V"

#### CALIDAD DEL CABLE OPTICO.

La calidad del cable óptico depende de factores como: Tipo de materiales usados, número de etapas y el proceso de fabricación por lo que puede ser evaluada en función de su comportamiento óptico, térmico y mecánico.

#### Calidad de la transmisión óptica.

Esta se evalúa comparando la atenuación de la fibra óptica antes y después del proceso de cableado, en este análisis se pueden tener dos casos: para cable de estructura densa y para un cable de estructuras libres. En el primer caso ocurre un incremento de la atenuación en 0.1 dB ( en promedio), en cambio para una estructura cilíndrica ranurada la atenuación decrece

en 0.1 dB para una longitud de onda de 1.3  $\mu\text{m}$  (fig. VII.9) y se debe a que la fibra está menos sujeta a tensión.

VALOR MEDIO EN dB/Km	0.85 $\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	1.55 $\mu\text{m}$
Antes de la fabricación.	2.9dB/Km	0.6dB/Km	0.4dB/Km
Después de la fabricación.	2.5dB/Km	0.5dB/Km	0.3dB/Km

Figura VII.9 Atenuación en un cable cilíndrico ranurado.

#### Calidad del comportamiento térmico.

Está en función del proceso de fabricación y de los materiales usados. Cualquier diferencia en los coeficientes de expansión que no sea debidamente compensada produce pérdidas por curvaturas que resultan cuando el cable se contrae o expande - después de cierto límite. Para un cable de fibras libres la estabilidad térmica está dada por holguras en el diseño del cable, de modo que los parámetros geométricos del mismo tienen un papel importante.

#### Calidad del comportamiento mecánico.

Estudios realizados demostraron que para que las fibras ópticas tengan un tiempo de vida de más de treinta años, no deben sufrir deformaciones mayores de 0.2% de su forma original. En algunas aplicaciones esta deformación se sobrepasa, por lo que se tienen diseños especiales de cable que se basan en el tipo de material del refuerzo central y del recubrimiento.

Con un control adecuado de los procedimientos de fabricación del cable se puede reducir el número de fallas durante la

instalación y puesta en operación del mismo.

#### APLICACIONES DEL CABLE OPTICO

Las aplicaciones del cable de fibra óptica se dividen en tres grandes grupos: instalación subterránea (ductos), aérea y submarina. Cada aplicación presenta características especiales y las analizaremos por separado.

##### Instalación subterránea.

Durante la instalación subterránea el cable se somete a dos tipos de proceso: la misma instalación que implica ejercer tensiones relativamente altas durante períodos cortos, y la condición de servicio normal en donde los esfuerzos son menores. En tendidos subterráneos, la deformación no es muy considerable por lo que las condiciones de tensión mecánica no son muy estrictas, y el diseño del cable óptico puede realizarse con mayor facilidad.

##### Instalación aérea.

A veces es más conveniente hacer un tendido aéreo para aprovechar el bajo peso de los cables ópticos y los postes o torres de líneas ya existentes, pero se requiere que los cables ópticos puedan soportar deformaciones del orden de 1% por lo que las fibras ópticas deben protegerse adecuadamente. Deben considerarse los esfuerzos de tensión originados por el mismo peso del cable, la presión del viento, carga del hielo y variación de temperatura. Se han obtenido deformaciones entre 0.4 y 0.8%, con una carga de hielo de 30 a 60 N/m y en general ha sido sobre postes de línea telefónica.

En el diseño de cables ópticos para líneas de alta tensión se debe someter al cable a condiciones severas de operación, ya que los claros entre las torres son generalmente mayores a 100 metros y las condiciones ambientales pueden ser muy variables. Por lo anterior se han diseñado diferentes tipos de cables a fin de reducir la carga mecánica de las fibras durante su operación normal. Hay tres tipos de diseño usados; cable unido a mensajero, cable autoportado y cable interconstruido.

El cable unido a mensajero permite un adecuado tensionado de fibra óptica. El problema más importante es evitar tensiones excesivas o concentradas en los puntos de amarre por desigualdad de elongación entre el cable mensajero y el cable óptico, para lo que se debe diseñar el cable a la medida (fig. VII.10).



Fig.VII.10 Cable óptico unido a mensajero

El cable autoportado agrega a los cables de línea instalados su peso, lo que puede causar sobrecargas mecánicas en algunos tramos de las torres; Sin embargo, se ha desarrollado un diseño de tipo dieléctrico que puede disminuir este problema, pero en los claros que requieren las líneas de alta tensión no se dan buenos resultados, sobre todo por los efectos de galopeo y vibraciones por influencia del viento (fig. VII.11).

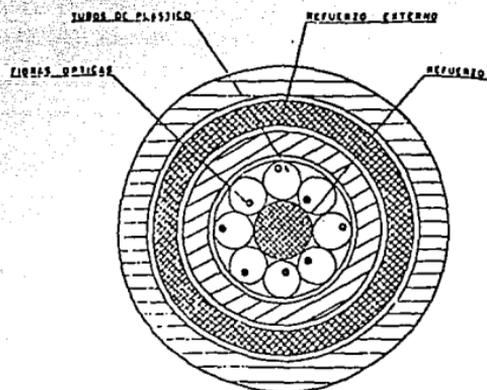


Fig.VII.11 CABLE AUTOSOPORTADO

El cable interconstruido cumple las funciones de un cable de potencia y las de un cable de telecomunicación, ya que el cable óptico se encuentra contenido dentro del cable de potencia con lo que se evita modificar las torres para la instalación de un cable adicional. Además las características mecánicas del cable conductor y del elemento de refuerzo central permiten a las fibras ópticas cierta holgura (fig. VII.12).

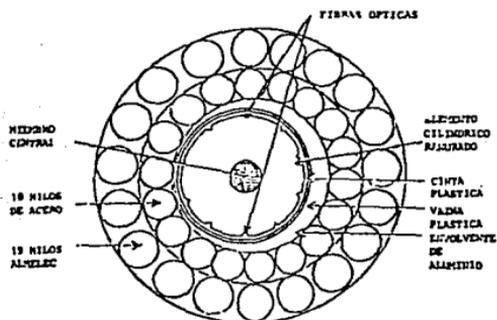


Fig.VII.12 Cable óptico interconstruido en el cable de cuerda

### Instalación submarina.

De esta aplicación se espera obtener grandes beneficios, al instalar cables intercontinentales que tengan alta competitividad con los enlaces via satélite. Deben tener una protección mecánica para soportar las grandes presiones hidráulicas en el fondo del mar y los esfuerzos de tensión durante las ma  
niobras de instalación.

El elemento principal del diseño es un tubo metálico don  
de se contiene a las fibras ópticas. Dicho tubo debe soportar deformaciones de entre 0.5 a 0.7% y conducir energía eléctrica para telealimentar a los repetidores.

## CAPITULO VIII.

### APLICACIONES COMUNES.

Existe un campo extenso de aplicaciones de fibras ópticas, no sólo en sistemas de comunicación, sino también en sistemas de medición desde lugares remotos o para control en sitios de alta interferencia electromagnética. A continuación mencionaremos algunos de los ejemplos más comunes de aplicación de los sistemas de fibras ópticas.

### SISTEMAS TELEFONICOS.

A pesar del amplio campo de aplicación, las comunicaciones telefónicas son las que más utilizan las fibras ópticas.

El primer sistema de comunicación por fibras ópticas para tráfico telefónico fué instalado en California en 1977 por GTE (General Telephone Company), este sistema cuenta con 44 canales de voz, con una velocidad de transmisión de 1.544 Mb/seg. sobre una ruta de 9.1 Km, usando dos repetidores. El cable óptico fué tendido atravezando 55 pozos de inspección y tiene 20 empalmes a través de su ruta; El cable es de seis fibras.

La Administración Telefónica de Bélgica (RTT), junto con GTE implementaron una instalación de una cadena de comunicación por fibras ópticas entre Bruselas y Vilvoorde. La cadena de 10.4 Km está diseñada para transportar 480 canales de voz. La figura VIII.1 muestra la ruta del cable con el sitio de tres repetidores y diez puntos de empalme. El cable usado fué diseñado por la Corporación General de Cables (GCC) para instalación subterránea

y consiste en seis pares de fibras de índice gradual y siete pares de cables de cobre dentro de un miembro central, los que se usan para alimentar de corriente directa a los repetidores y ayudar a localizar puntos de falla. Las pérdidas promedio son de menos de 6.5 dB/Km.

Otros sistemas de comunicación telefónica fueron instalados en Fort Wayne, Indiana; Vancouver, Columbia Británica; Tampa Florida; Honolulu, Hawaii; Oil City, Pennsylvania; Etc.

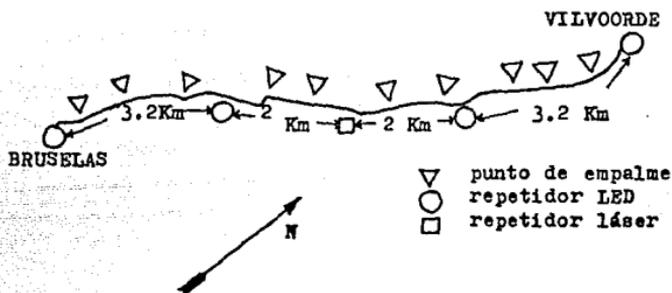


Fig.VIII.1 Mapa de la ruta del sistema de fibras ópticas en Bruselas Bélgica.

El sistema óptico usado en Bélgica se ilustra en la figura VIII.2. El sistema CEPT3 utiliza LEDs en terminales y repetidores. El sistema CEPT4 usa diodos láser en terminales y el repetidor (al centro de la ruta). Utiliza fotodiodos de avalancha en todos los receptores. La fuente de c.d. es conectada con los repetidores mediante los alambres de cobre incluidos en el cable.

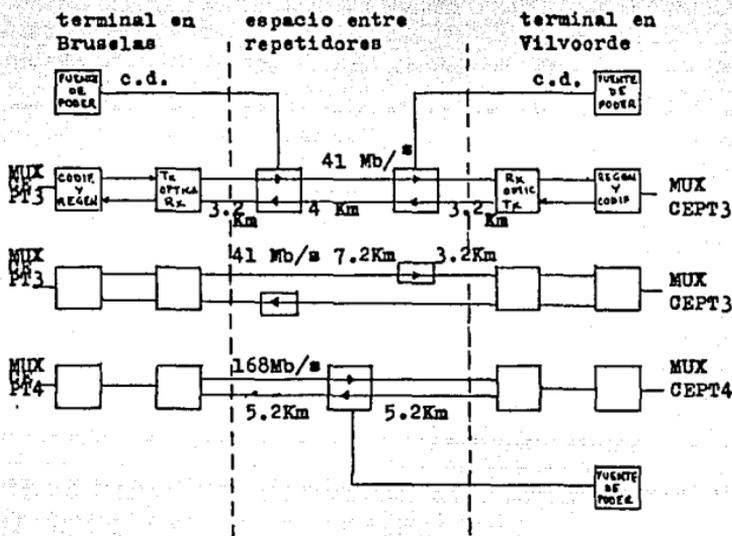


Fig.VIII.2 Sistema de fibras ópticas de Bélgica.

#### MEDIDOR DE TEMPERATURA.

En la figura VIII.3 se muestra el diagrama de un sistema de medición de temperatura que utiliza fibras ópticas como medio de transmisión. Un sistema digital simple de 50 KHz (ancho de banda) transmite el voltaje de un sensor de temperatura remoto a un receptor colocado a cierta distancia ( 166 metros).

El sensor de temperatura lo forma un diodo de silicio (FD-200) colocado en un puente y un amplificador operacional (741) y convierte la temperatura en señal de voltaje, la cual llega a un convertidor voltaje-frecuencia (LM566CN). Los pulsos de salida del convertidor llegan a dos inversores TTL (7400) donde ad-

quieren forma y llegan a un LED de alta radiación. Este LED es conectado con la fibra óptica mediante un conector.

La recepción de la señal óptica se realiza en un fototransistor que convierte dicha señal en corriente eléctrica, la cual llega a un contador de frecuencia y a un circuito de impresión (las compuertas inversoras le dan forma a los pulsos).

Este circuito puede operar con temperaturas que van desde  $-25^{\circ}\text{C}$  hasta los  $120^{\circ}\text{C}$ .

Del mismo modo, pueden diseñarse circuitos para medición de presión, aceleración, posición física o cualquier cantidad que se quiera obtener remotamente.

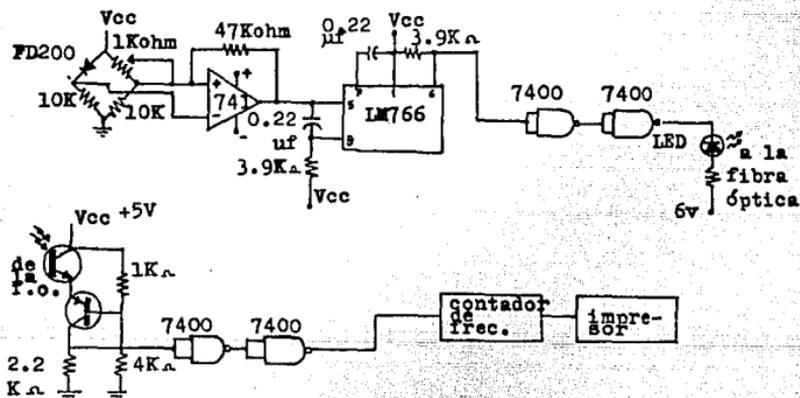


Fig.VIII.3 Medidor de temperatura.

### TELEIMPRESION

Un uso diferente es el mostrado en la figura VIII.4, que presenta la interconexión de dos teleimpresores colocados en lugares distantes; Este sistema opera a menos de 100 KHz.

La señal a transmitir pasa por un transistor que opera en las regiones de corte y saturación y por dos compuertas inversoras que dan forma a los pulsos.

En la recepción se utilizan fototransistores, los 170 volts c.d. en la terminal se suman a los pulsos, que fueron amplificados con anterioridad, para entrar al sistema de impresión. El sistema cuenta con una llave selectora para realizar un lazo interno de prueba.

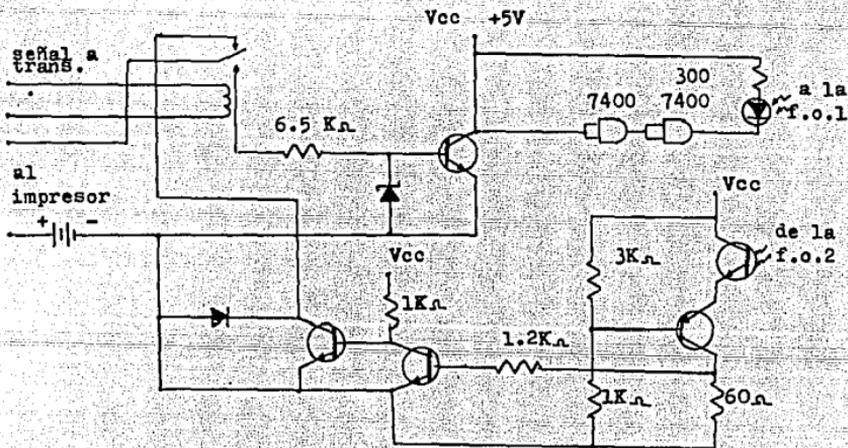


Figura VIII.4 Circuito de teleimpresión.

### SISTEMA DE CONTROL REMOTO.

Otro ejemplo del uso de transmisión por fibras ópticas es en control de servo-sistemas remotos. En este caso, la salida de un block de tonos es convertido en "tono digital" por el circuito mostrado en la figura VIII.5. La transmisión puede hacerse por más de 300 metros. La señal es enviada mediante un LED a la fibra óptica. La recepción la realiza un fototransistor, el voltaje en que se convierte la señal óptica, es amplificado en un amplificador operacional (741); nueve circuitos PLL (Phase Lock Loop) LM567, en el receptor proveen nueve distintas funciones de control.

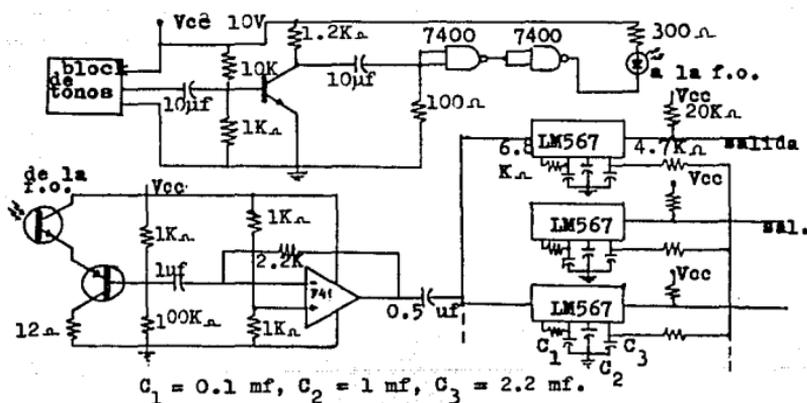


Figura VIII.5 Sistema de control remoto.

### TRANSMISION DE DATOS.

Los sistemas de fibras ópticas también son muy usados en transmisión de datos entre computadoras y sus periféricos. Para lo que se aprovechan sus ventajas en la reducción de errores en el manejo de la información. En la figura VIII.6 se muestra el diagrama a bloques de un sistema Harris modelo 4359, de transmisión de datos. En el capítulo siguiente presentaremos un diseño simple de un circuito de transmisión por fibra óptica.

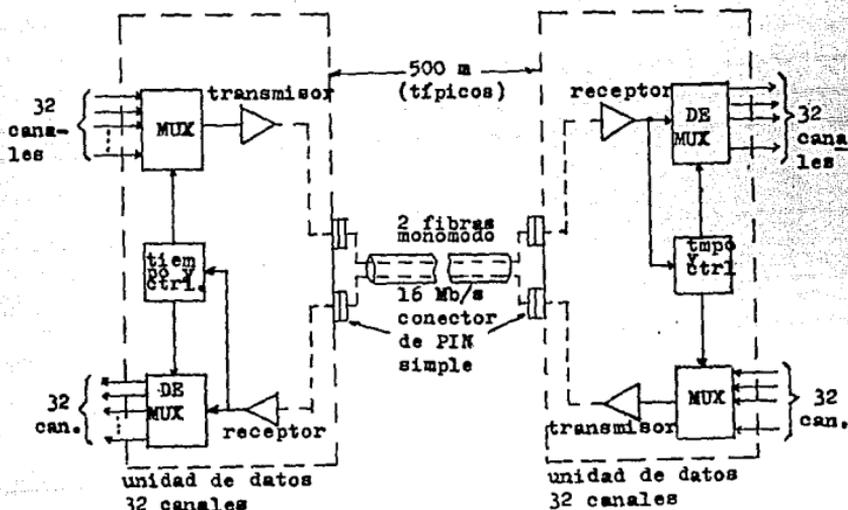


Fig.VIII.6 Diagrama a bloques del sistema de comunicación Harris, modelo 4359 ( Ilustración del Breviario 1sa-5088 de la Corporación Técnica Harris)

## CAPITULO IX

### TRANSMISION DE DATOS.

Diseño de un circuito básico.

Para el diseño de un circuito experimental, consideremos el siguiente diagrama a bloques:

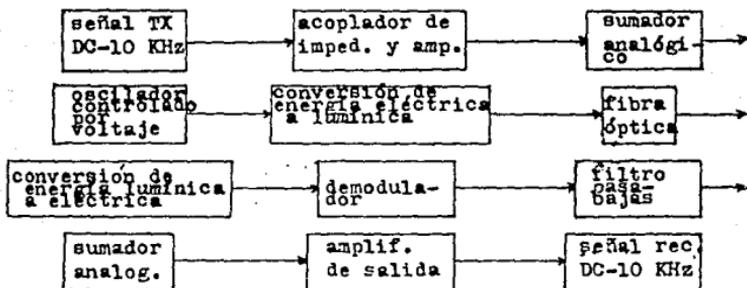


Fig.IX.1 Diagrama a bloques del sistema.

Diseño del circuito modulador:

Para un circuito de modulación/demodulación en frecuencia es muy útil la técnica del "Phase-Locked Loop" (PLL), que provee alta inmunidad al ruido. En la actualidad encontramos en el mercado nacional tres tipos de circuitos PLL: CD4046B, MC14046B y LM565C.

En la tabla siguiente se muestran algunas especificaciones para cada uno de los circuitos anteriores.

	LM565C	MC14046	CD4046	unidad
Voltaje de alimentación máx.	+12	+18	+20	volt
Consumo de potencia máximo	300	6	6	mW
Frecuencia de operación máx.	0.5	1.9	2.4	MHz

figura IX.2

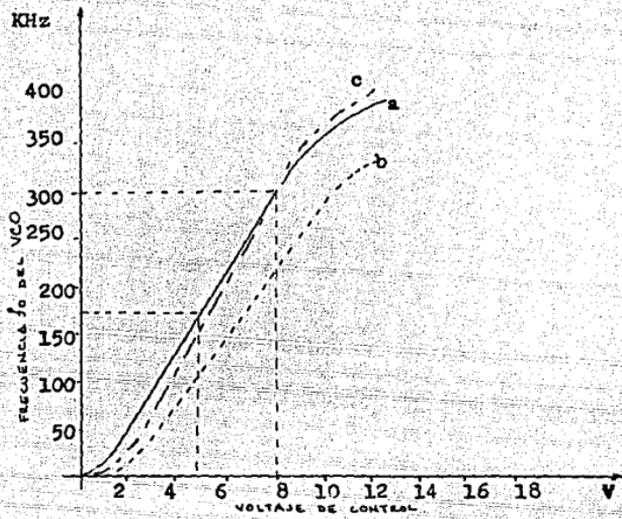
El circuito LM565C presenta sobrecalentamiento al aplicarle el voltaje máximo de alimentación, lo cual no sucede con los 4046,

Los circuitos 4046 tienen menor consumo de potencia, por lo que son más convenientes para un circuito con un consumo menor a 1 watt.

Para el circuito LM565C se tiene una variación alta del voltaje de salida con respecto a la temperatura:  $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  (de fabricante), sin embargo para los circuitos 4046B tienen rangos de variación de  $0.04 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ .

Dando preferencia a los circuitos 4046B para nuestro diseño, veamos ahora algunas diferencias entre el CD4046B y el MC14046B en la gráfica de la figura IX.3 que muestra la frecuencia de la señal de salida en el VCO para los casos siguientes:

	$R_{13}$ Kohms	$C_{12}$ pfd
a) CD4046 B	56	82
b) MC14046B	56	82
c) MC14046B	39	82



- a) CD4046D
- b) MC14046B
- c) MC14046B

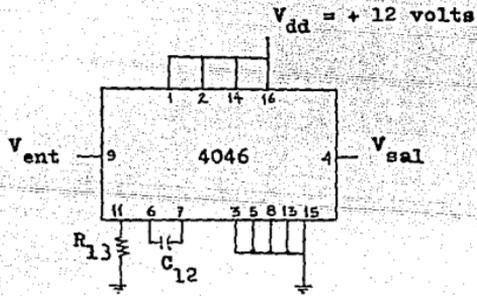


Fig. IX.3 Gráfica de la frecuencia del VCO en función de su voltaje de control y conexión externa del 4046B.

En la figura IX.3 se muestra la frecuencia de la señal de salida del VCO en función del voltaje D.C. aplicado en su terminal de control (pin 9). Se debe mencionar que el VCO produce una señal cuadrada cuya frecuencia la determinan: El voltaje en la entrada del oscilador (pin 9); Una o dos resistencias externas; Un capacitor externo y el voltaje de polarización (Vdd).

Los valores de  $R_{13}$  y  $C_{12}$  son los usados por el fabricante para obtener la gráfica de la figura IX.3 (mayor linealidad).

Se puede observar en la gráfica de la figura IX.3 que las curvas para el circuito CD4046 (a) y MCL4046 (b) son aproximadas, por lo que para usar uno u otro circuito se deberá cambiar el valor de la resistencia  $R_{13}$ . Aún con lo anterior, se pueden tener variaciones en la frecuencia de el VCO de cada circuito 4046 por lo que es de utilidad un sumador analógico, que nos ayude a variar el voltaje D.C. de entrada al VCO independientemente de la señal de entrada al sistema.

Siguiendo con la curva de la figura IX.3 la frecuencia mínima sería de 185 KHz a un voltaje en la terminal de control de +4.8 y la frecuencia máxima sería de 300 KHz para un voltaje de +8.2 volts ( rango en el que la frecuencia varía linealmente).

Consideremos el sumador analógico de la figura IX.5, como es un sumador inversor,  $V_x$  debe adquirir valores entre -4.8 y -8.2 volts y no salir de este rango para conservar la linealidad de la región de trabajo del VCO.  $V_x$  debe variar 3.4 volts, esta variación se puede lograr con el divisor de voltaje siguiente, donde deberá cumplirse la condición indicada a continuación (figura IX.4).

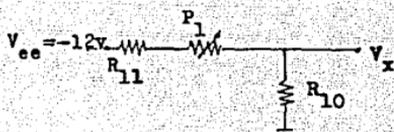


Fig.IX.4

Si  $R_1$  es mínimo: 
$$\frac{V_{cc}R_{10}}{R_{10} + R_{11}} = V_{x_{\text{máx}}} = -8.2 \text{ v}$$

$$-\frac{12R_{10}}{R_{10} + R_{11}} = -8.2 \text{ v.} \quad \text{ecuación (1)}$$

Si  $R_1$  es máximo: 
$$\frac{V_{cc}R_{10}}{R_{10} + R_{10} + R_{11}} = V_{x_{\text{mín}}} = -4.8 \text{ v}$$

$$-\frac{12R_{10}}{R_{10} + R_{10} + R_{11}} = -4.8 \text{ v} \quad \text{ecuación (2)}$$

Elegimos una resistencia  $R_{10}$  de 1 Kohm, con lo que esta resistencia consume 8.2 mamp. cuando  $P_1$  toma su valor mínimo.

Sustituyendo el valor anterior en la ecuación (1) se tiene que:  $R_{11} = 0.463$  Kohms, tomamos un valor comercial de 470 ohms.

Sustituyendo en la ecuación (2):

$R_1 = 1.03$  Kohms, tomamos el valor comercial de 1 Kohm.

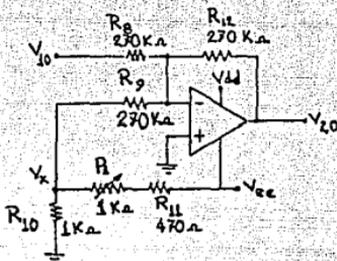


Fig IX.5 Circuito sumador analógico.

Para obtener los valores de  $R_8$ ,  $R_9$  y  $R_{12}$  consideramos ganancia unitaria, por lo que tendremos:

$$V_{20} = -R_{12} \left[ \frac{V_{10}}{R_8} + \frac{V_x}{R_9} \right]$$

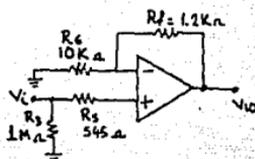
se debe cumplir:  $V_{20} = - (V_{10} + V_x)$ , para esto :  $R_{12} = R_8 = R_9$  podemos escoger un valor de 270 Kohms, con lo que para  $P_1$  mínimo, la corriente a través de  $R_9$  es de 1 mamp.

En la figura IX.3 observamos que se puede ampliar el rango de frecuencias del VCO sin perder la linealidad, desde 112 KHz hasta 314 KHz, correspondientes a voltajes de 3.0 v y 8.6 v. La diferencia entre estos voltajes es de 5.6 v, así que las frecuencias máxima y mínima serán obtenidas si la señal en  $V_{10}$  es de  $5.6 v_{pp}$  de amplitud, o sea que para una señal de entrada de  $5 v_{pp}$ , esta debe ser amplificada 1.12 veces.

En este amplificador se debe tener una impedancia de entrada de 1 Mohm, que se requiere en especificaciones, así, el

amplificador será no inversor ( por su característica de impedancia de entrada alta), que se muestra en la figura IX.6

FigIX.6 Amplificador de entrada



Se tiene que:  $V_{10} = 1.12 V_1$

$\frac{V_{10}}{V_1} = 1 + \frac{R_7}{R_6} = 1.12$  por lo tanto:  $R_7 = R_6 (0.12)$   
un valor adecuado para  $R_6$  será 10 Kohms, con lo que  $R_7 = 1.2 K$

Por otra parte:

$$R_7 = R_5 \left( 1 + \frac{R_7}{R_6} \right)$$

de donde:  $R_5 = 545$  ohms. El circuito modulador completo se muestra en la figura IX.8.

Diseño del circuito demodulador.

Utilizando el circuito 4046 podemos disponer del siguiente arreglo (figura IX.7):

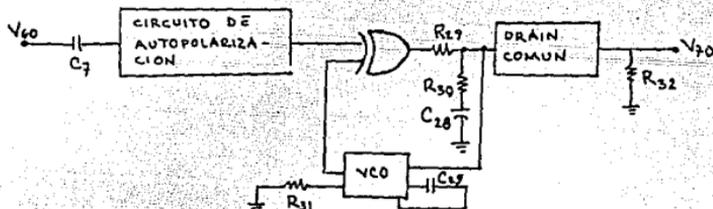


Fig. IX.7 PLL como demodulador de F.M.

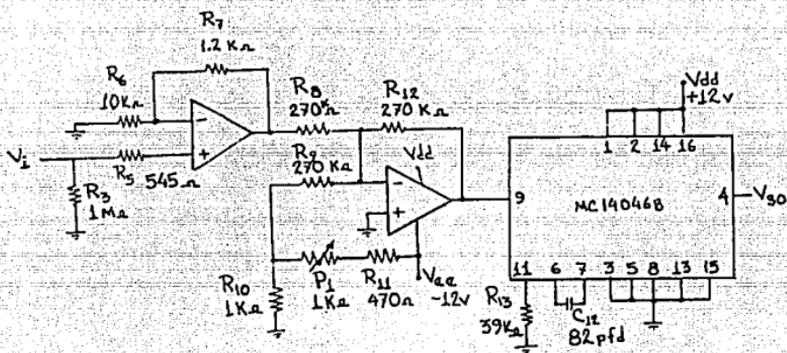


Figura IX.8 Circuito modulador.

En la fig. IX.7 anterior, establezcamos una frecuencia libre de oscilación aproximada a la del VCO, para esto usaremos los valores siguientes:

$$R_{31} = R_{13} = 56 \text{ Kohms} \quad \text{para CD4046B.}$$

$$C_{29} = C_{12} = 82 \text{ pfd}$$

$$R_{31} = R_{13} = 39 \text{ Kohms} \quad \text{para MCI4046B.}$$

$$C_{29} = C_{12} = 82 \text{ pfd}$$

El filtro pasa-bajas influirá en el rango de captura, el cual deberá ser grande, para poder demodular una señal F.M. de banda ancha. Se asignará una frecuencia de corte alta para el filtro, de este modo, se obtiene una constante de tiempo alta que nos proporciona la ventaja de conservar la sincronía durante una pérdida momentánea de la señal, para esta constante de tiempo alta, elegimos valores de:  $R_{29} = 1 \text{ ohm}$  y  $C_{28} = 0.01 \text{ } \mu\text{fd}$ .

El valor para  $R_{30}$  lo elegimos de 47 ohms. Es permitida una gran variedad en los valores de  $R_{29}$ ,  $R_{30}$  y  $C_{28}$  (que forman el filtro pasa-bajas) ya que la salida demodulada no se toma directamente del filtro, sino de la configuración de "drain común" que se conecta a la salida del filtro.

La resistencia  $R_{32}$  puede tomar valores entre 10 Kohms y 1 Mohm. Elegimos un valor de 100 Kohms.

Diseño del filtro y amplificador de salida.

Una vez demodulada, la señal debe ser filtrada y amplificada. Elegimos la frecuencia de corte del filtro de 10 KHz.

Siguiendo el procedimiento de diseño presentado en la referencia 5, para un filtro Butterworth pasa-bajas de segundo

orden, tenemos lo siguiente:

$$\text{Ganancia máxima: } H_0 = \frac{R_{34}}{R_{33}}$$

De tablas se eligen:

$$H_0 = 1$$

$$\alpha = 1.2$$

$$\omega_c = 125\,663.7 \text{ rad/seg}$$

$$C_{30} = 3900 \text{ pfd}$$

$$C_{31} = K C_{30}$$

$$K = 0.012$$

$$C_{31} = 46.8 \text{ pfd aproximamos a } 47 \text{ pfd.}$$

Calculamos:

$$R_{34} = \frac{\alpha}{2\omega_c C_{31}} = 101.6 \text{ aproximamos a: } 100 \text{ Kohms.}$$

$$R_{33} = \frac{R_{34}}{H_0} = 101.6 \text{ aproximamos a: } 100 \text{ Kohms.}$$

$$R_{35} = \frac{1}{\omega_c^2 C_{30}^2 R_{34} K} = 346.95 \text{ ohms (aprox. } 350 \text{ ohms)}$$

A la salida del filtro se colocó una etapa RC para ajustar  $\omega_c$ , eligiendo  $R_{35} = 350 \text{ ohms}$  y  $R_{37} = 2.2 \text{ Kohms}$ . El filtro resultante aparece en la figura IX.9

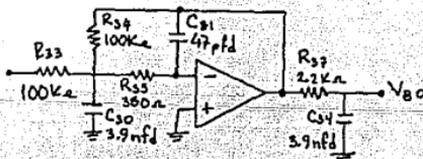


Fig. IX.9 Filtro pasa-bajas.

La señal que se obtiene del filtro anterior es invertida y con cierto valor de c. d. , por lo tanto, tendremos que corregir este nivel de voltaje. Además que de resultados experimentales, observamos que es necesario amplificar la señal que obtenemos del filtro (aproximadamente 4.2 volts) de modo que:

$$V_o = 5 v_{pp} \longrightarrow V_o = 1.2 V_{80}$$

Esto lo logramos con un sumador inversor, donde se debe cumplir lo siguiente:

$$V_o = -R_{40} \left( \frac{V_{80}}{R_{38}} + \frac{V_y}{R_{39}} \right)$$

Para el circuito de la figura IX.10; elegimos valores para  $R_{38} = R_{39} = 56 \text{ Kohms}$ , para obtener la ganancia necesaria.

Para corregir el nivel de corriente directa (que es negativo) en  $V_{80}$ , aplicamos en  $V_y$  un voltaje positivo, que puede ser el voltaje de polarización  $V_{dd}$  (+ 12 volt) a través de un potenciómetro instalado como divisor de voltaje, este potenciómetro  $P_2$  (ver figura IX.10) disipará hasta 3/4 Watts, asignamos un valor de 1Mohm al potenciómetro.

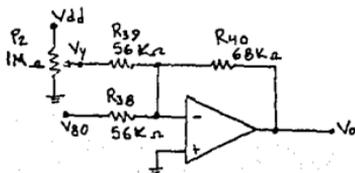


Fig.IX.10 Circuito sumador que corrige el voltaje de la señal de modulada.

El circuito demodulador completo se muestra en la figura IX.11.

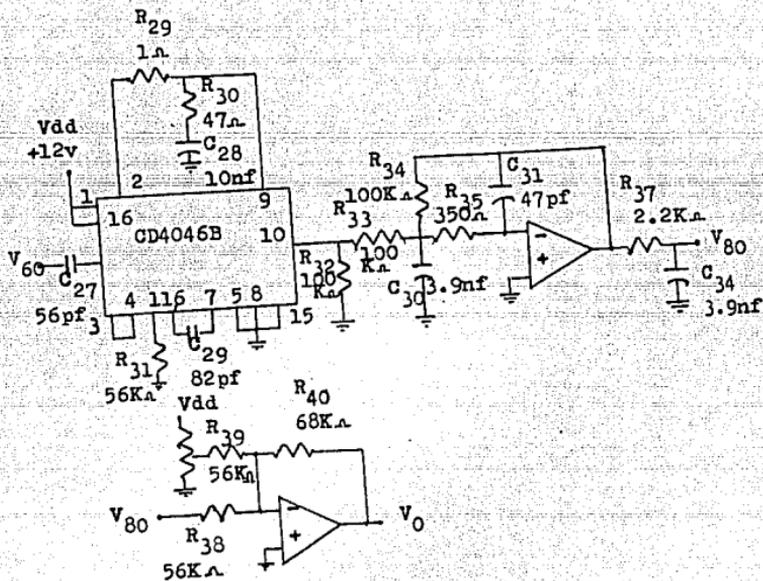


Figura IX.11 Circuito demodulador.

Diseño del sistema óptico de transmisión y recepción.

En el capítulo III se muestran dos configuraciones de circuito emisor óptico ( figuras III.7 y III.8), el primer circuito requiere de una red resistiva que asegure la saturación y el corte del transistor, en el segundo circuito, se tiene el inconveniente de requerir mayor consumo de potencia que el primero, sin embargo, es preferible por su simplicidad. El emisor del transistor es aterrizado, con lo que el diodo schottky no se requiere, por lo que el circuito emisor se plantea como en la figura IX.12 . El circuito utiliza al transistor como conmutador, o sea trabajando en las regiones de corte y saturación.

Para operar al transistor en la región de saturación, debe haber suficiente corriente de base, de modo que  $\beta I_B$  sea mayor que la corriente de saturación del colector:

$$I_{C_{\max}} = \frac{V_{cc} - V_{CEsat}}{R_{15}}$$

El LED ( $L_1$ ) es un FED086KLWA (de longitud de onda pico de 855 nm), que tiene corriente de polarización máxima de 150 mA. La corriente que se inyecta al LED es de 120 mA, que es la misma que acepta el colector del transistor, el voltaje de polarización para  $Q_1$  ( $V_{CC}$ ) es de 5V;  $Q_1$  tiene un voltaje de saturación de 0.9V. Al sustituir estos valores en la relación anterior, tenemos:

$$120\text{mA} = \frac{5\text{V} - 0.9\text{V}}{R_{15}} \quad \longrightarrow \quad R_{15} = 0.34 \text{ K ohms}$$

se escoge un valor comercial de 330 ohms.

El transistor  $Q_1$  usado es el SK3218 con las siguientes características básicas:

potencia máx.	2.5 w
$I_c$	400 mA
$V_{CBO}$	40 V
$V_{CE}$	20 V
$V_{EBO}$	3 V
$\beta$	80 típico
$f_t$	1300 MHz típico

Para saturar a  $Q_1$  la corriente de base debe ser:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{120 \text{ mA}}{80} = 1.5 \text{ mA}$$

El voltaje  $V_{30}$  es una señal cuadrada (del VCO) de 12V con una frecuencia mínima de 185 KHz y máxima de 300 KHz. Del circuito de la figura IX.12, se tiene que:

$$I_B = \frac{V_{30} - V_{BE}}{R_{14}}$$

donde :

$$R_{14} = \frac{V_{30} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12V - 0.7V}{1.5 \text{ mA}} = 7.5 \text{ Kohms}$$

valor que aproximamos a 6.8 Kohms (valor comercial), con lo que se obtiene el circuito de la figura siguiente:

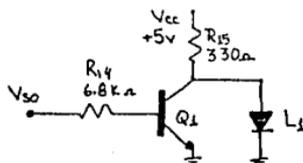


Fig.IX.12 Circuito emisor óptico.

El LED  $L_1$  estará acoplado a una fibra óptica multimodal, cuyas características se presentan en el apéndice B (pag.114 ).

El circuito receptor consiste de un fotodetector, un amplificador y un circuito procesador de señal. Usamos el circuito-receptor de transimpedancia de la figura VI.8 del capítulo VI de la siguiente forma (figura IX.13):

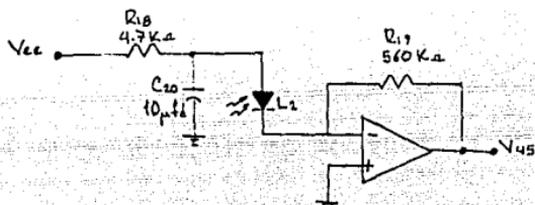


Figura IX.13 Receptor de transimpedancia.

El fotoreceptor usado es el BPX 65, que se polariza en inversa con un voltaje máximo de 50V. Otras de sus características son:

Area activa	1 mm <sup>2</sup>
Responsividad	0.60 A/W (850 nm)
	0.55 A/W (900 nm)
	0.15 A/W (1064 nm)
	0.20 A/W (450 nm)

V <sub>max</sub> de polarización	50 V
I <sub>obscuridad</sub>	1 nA
capacitancia	3.5 pfd
frecuencia de corte	500 MHz

Se utiliza uno de los cuatro amplificadores operacionales contenidos en el circuito integrado TL084, que tiene una impedancia de entrada de  $10^{12}$  ohms, un ancho de banda de 3MHz para ganancia unitaria y una capacitancia de entrada de 3 pfd.

La ecuación que define el ancho de banda del receptor es (ver capítulo VI):

$$B_r = \frac{A}{2\pi R_{19} C}$$

Siendo C la capacitancia del fotodiodo (3.5 pfd) más la capacitancia de entrada al amplificador operacional ( 3 pfd). Establecemos un ancho de banda de 400 KHz para el receptor de transimpedancia ( la frecuencia máxima posible de la señal modulada en frecuencia es de 314 KHz ). La ganancia de malla abierta del amplificador que corresponde a tal frecuencia es de 10 (según tabla de fabricante), por lo que, sustituyendo  $R_{19}$  en la relación arriba descrita:

$$R_{19} = \frac{A}{2\pi B_r C} = \frac{10}{2\pi(400\text{KHz})(6.5 \text{ pfd})} = 612 \text{ K}$$

usamos valor comercial de 560 Kohms.

Para  $R_{18}$  y  $C_{20}$  utilizamos valores típicos de 4.7 Kohms y 10  $\mu\text{fd}$  respectivamente.

En la segunda etapa de amplificación se incluye un capacitor de realimentación para reducir el ruido en altas frecuencias (figura IX.14), las frecuencias de corte inferior y superior son:

$$f_{\text{inf}} = \frac{1}{2\pi R_{20} C_{24}} \quad \text{y} \quad f_{\text{sup}} = \frac{1}{2\pi R_{21} C_{25}}$$

Tomando  $f_{inf} = 100\text{KHz}$  y  $f_{sup} = 400\text{KHz}$  (tomando en cuenta que se trabajará con frecuencias contenidas en ese rango), y eligiendo:

$$C_{24} = 4700 \text{ pfd} \text{ y } R_{21} = 2R_{20}$$

sustituimos en las relaciones anteriores para obtener:

$$R_{20} = \frac{1}{2\pi f_{inf} C_{24}} = \frac{1}{2\pi(100\text{KHz})(4700 \text{ pfd})} = 338 \text{ ohms}$$

aproximamos a 330 ohms.

$$R_{21} = 2(330) = 660 \text{ ohms}$$

aproximamos a 680 ohms.

$$C_{25} = \frac{1}{2\pi f_{sup} R_{21}} = \frac{1}{2\pi(400\text{KHz})(680\text{ohms})} = 585 \text{ pfd}$$

usamos el valor comercial de 560 pfd.

Para utilizar los otros dos amplificadores operacionales del circuito TL084 (cuadruple), establecemos para ganancia de 2 los valores siguientes:

$$R_{22} = R_{24} = 1\text{Kohm} \quad \text{y} \quad R_{23} = R_{25} = 22\text{Kohms.}$$

Las tres etapas de amplificación que siguen al receptor de transimpedancia son entonces, las de la figura IX.14

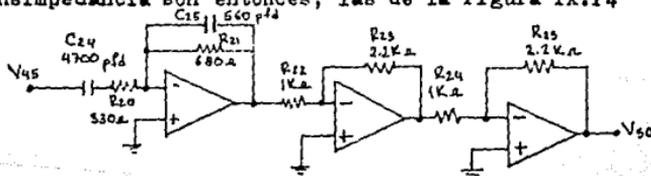


Fig. IX.14 Etapas de amplificación siguientes al receptor de transimpedancia.

Se debe usar un circuito comparador ( detector de cruce por cero) para obtener una señal cuadrada proporcional a los voltajes de polarización en amplitud. El comparador usado es el de la figura IX.15, con un circuito integrado LM710 (comparador de alta velocidad). Los valores son los recomendados por el fabricante.

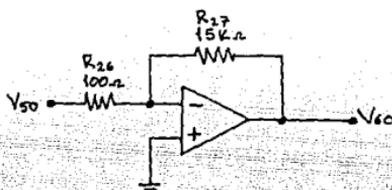
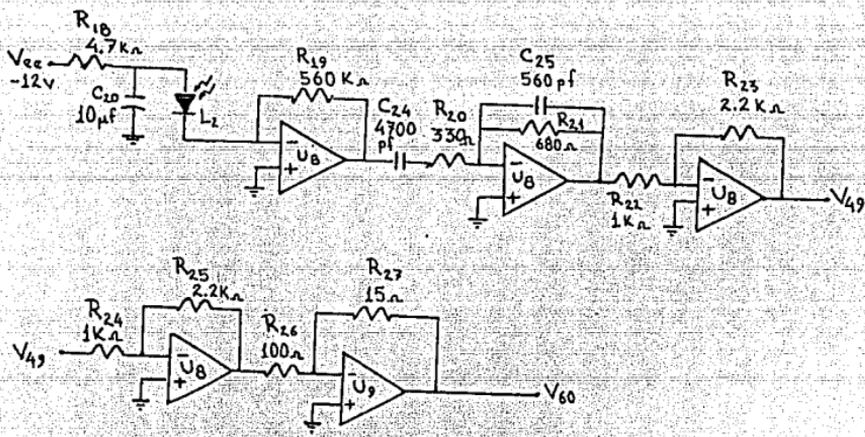


Figura IX.15. Circuito detector de cero.

Cabe mencionar que la sensibilidad del circuito fotodetector, está determinada por el ruido resultante de la conversión de fotón a electrón y por el ruido térmico de la circuitería que se usa como amplificador, sin embargo, al usar fotodiodos PIN esas fuentes de ruido térmico son dominantes y el ruido de la conversión es mucho menor.

El circuito receptor óptico completo se representa en la figura IX.16



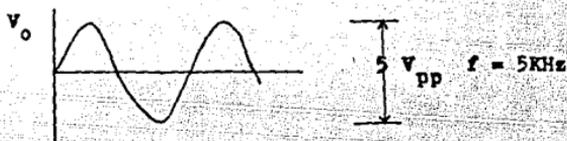
U<sub>8</sub> Circuito TL084 (Cuadruple)

U<sub>9</sub> Circuito LM710

Figura IX.16 Circuito receptor óptico

En seguida veremos los resultados que se obtubieron al - aplicar  $V_i$  con diferente valor de frecuencia al circuito dise- ñado, durante pruebas de laboratorio.

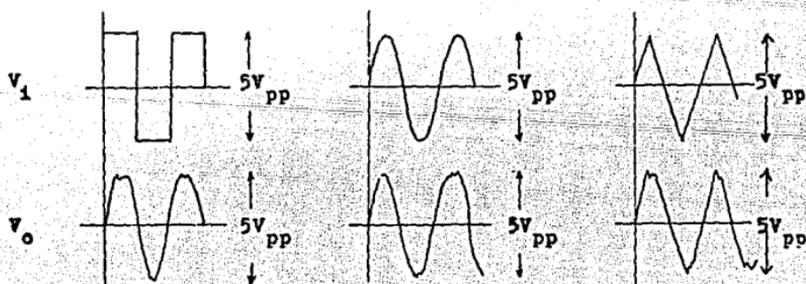
Para  $V_i = 5 V_{pp}$  con frecuencia de  $f = 5 KHz$  :



Para  $V_i = 5 V_{pp}$  con frecuencia de  $f = 10 KHz$



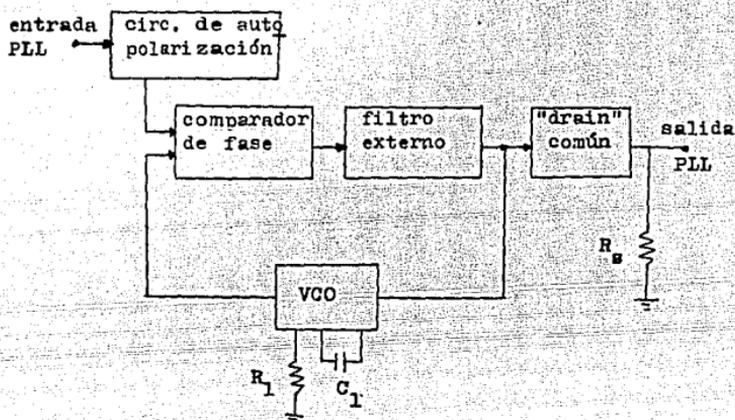
Para frecuencias mayores de 10 KHz la señal de salida co- mienza a atenuarse y deformarse, de modo que para señales de entrada senoidal, cuadrada o triangular, la señal de salida - es siempre senoidal.







El diagrama a bloques del circuito utilizado en nuestro proyecto se representa como:



El VCO requiere un capacitor externo ( $C_1$ ) y una o dos resistencias externas ( $R_1$  y  $R_2$ ). La resistencia  $R_1$  y el capacitor  $C_1$  determinan el rango de frecuencias del VCO y la resistencia  $R_2$  permite al VCO disminuir su rango de frecuencias, si asignamos un valor finito a  $R_2$  las frecuencias mínima y máxima estarían más cerca de la frecuencia de oscilación.

El VCO tiene una impedancia de entrada alta (del orden de  $10^{12}$  ohms), que permite simplificar el diseño del filtro pasabajas, al hacer posible una amplia selección de valores RC. Para no cargar al filtro se coloca un "drain común" en la entrada del VCO, en su salida se obtiene la señal demodulada (terminal 10), si se va a usar esta terminal se colocará una resistencia de carga ( $R_g$ ) de 10Kohms o mayor, de lo contrario, se dejará flotando.

Para habilitar al VCO y al "drain común" se coloca un "cero lógico" en la terminal "inhibit". Los niveles lógicos para circuitos C-MOS se dan como sigue:

$$\text{cero lógico} = 0.3(V_{dd} - V_{ss})$$

$$\text{uno lógico} = 0.7(V_{dd} - V_{ss})$$

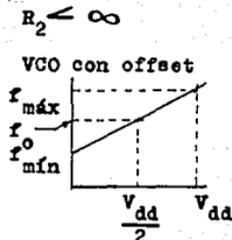
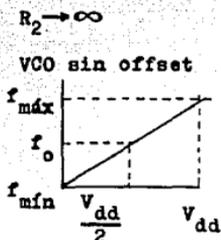
El circuito de autopolarización es de especial utilidad cuando la señal de entrada se presenta con poca amplitud, ya que la ajusta a la región lineal del amplificador. Se recomienda acoplar con un capacitor las señales con bajo nivel de amplitud, para asegurar que la señal tenga efecto sobre los circuitos digitales del comparador de fase.

El comparador de fase uno, es un circuito OR exclusivo que habilita al sistema para que permanezca en el rango de mantenimiento aún en presencia de altos niveles de ruido a la entrada.

Si se utiliza un PLL en la demodulación de una señal modulada en frecuencia, el VCO sigue la frecuencia instantánea de esa señal. El voltaje de entrada al VCO, que corresponde a la señal de error proporcionada por el detector de fase, ya filtrada, es el voltaje de la señal demodulada. El comparador de fase uno es usado debido a sus características de alto rechazo al ruido en la señal de entrada.

INFORMACION DE DISEÑO

FRECUENCIA  
DEL VCO



RANGO DE  
MANTENI-  
MIENTO.  
(  $2f_L$  )

$2f_L =$  rango total de frecuencia VCO

$$2f_L = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}$$

RANGO DE  
CAPTURA  
(  $2f_C$  )

Depende de las  
características del  
filtro pasa-bajas.

$$f_C = f_L$$

$$f_{\text{mín}} = \frac{1}{R_2(C_1 + 32 \text{ pfd})}$$

si  $V_{\text{vco}} = V_{\text{ss}}$

$$f_{\text{máx}} = \frac{1}{R_1(C_1 + 32 \text{ pfd})} + f_{\text{mín}}$$

si  $V_{\text{vco}} = V_{\text{dd}}$

APENDICE B.

INFORMACION TECNICA DE CABLES DE FIBRA OPTICA.

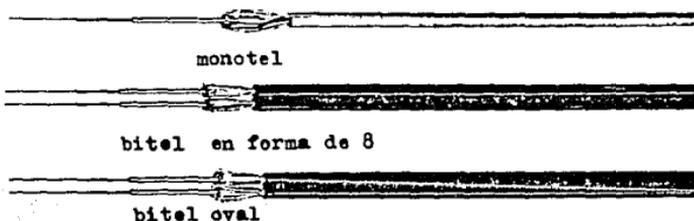
Cable terminal de fibra óptica.

Se tiene una sola fibra óptica con protección termoplástica y refuerzo textil, cubierto finalmente con material plástico no flamable, a este tipo se le conoce como MONOTEL.

El cable BITEL está formado por dos cables monotel formando un 8 o en forma ovalada.

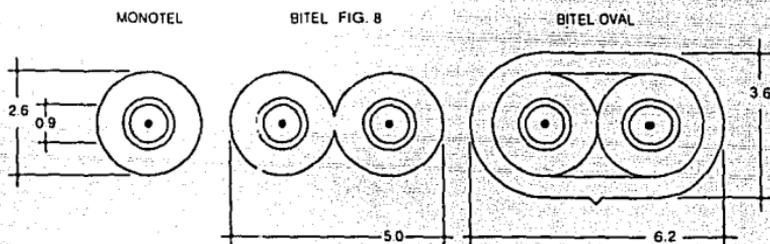
Se aplica en remates de cables troncales en la conexión de equipos de transmisión y recepción. Se recomienda también para enlaces cortos ( hasta 100 m ) en el interior de edificios, como redes de computadoras, circuitos cerrados de televisión, tele control y en áreas con fuertes campos electromagnéticos, explosivas o eléctricamente peligrosas.

Presenta alta capacidad de transmisión, resistente al fuego, el cable bitel simplifica la interconexión por pares sin problemas de identificación por fibra.



Características de las fibras.

	MONOMODO	MULTIMODAL
atenuación (dB/Km)	≤ 0.5	≤ 3.0
apertura numérica		0.2
longitud de onda (nm)	1130-1270	
ancho de banda (MHz-Km)		400-600
diámetro del núcleo (μm)	9	50
diámetro del revestimiento (μm)	125	125
diam. de la protección (μm)	250	250



características del cable.<sup>1</sup>

	MONOTEL	BITEL	
		FIG.8	OVAL
dimensiones (mm)	ver figuras		
peso (Kg/Km)	5.76	11.6	22
tensión máxima permitida (Kg) <sup>2</sup>	20	30	
resistencia a la compresión (Kg/cm)	400		
radio mínimo de curvatura (mm)	25		
temperatura de operación (°C)	-10 a 50		

<sup>1</sup> datos nominales, sujetos a tolerancias normales de manufactura.

<sup>2</sup> aplicada sobre el elemento de tracción.

### Cable troncal de fibras ópticas.

Es un cable de fibras ópticas identificadas por su protección termoplástica de color, en forma de tubo seco o relleno con compuesto repelente a la humedad. Los tubos que contienen a las fibras son cableados en forma helicoidal sobre un elemento de tracción metálico o dieléctrico. El cable se impregna con gela tina repelente a la humedad y se reune con cinta e hilos de ma terial plástico. Se cubre con armadura metálica y/o refuerzo textil, sobre lo que se extruye una cubierta exterior de poli-etileno.

Se usa en enlaces de alta densidad de comunicaciones, como grandes centrales telefónicas, radiofónicas, televisivas y de cómputo y en áreas de alto riesgo o interferencia electromagnética, como petroquímica o centrales de generación y distribución eléctrica. Es un cable ligero, compacto y flexible, fácil de instalar en ductos o directamente enterrado. Es resistente a la intemperie y abrasión, el cable armado es especialmente resistente a condiciones adversas como humedad, agentes químicos, roedores, etc.



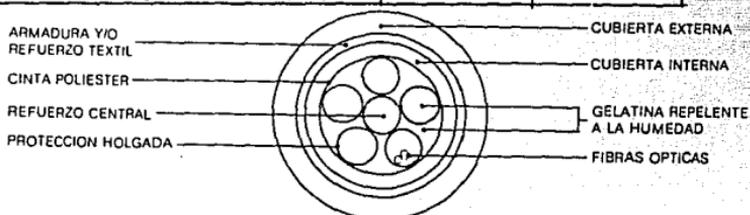
Armado

Dieléctrico



### Características de las fibras ópticas.

	UNIMODO	MULTIMODO
atenuación (dB/Km)	= 0.5	= 3
apertura numérica		0.2
longitud de onda de corte (nm)	1130-1270	
ancho de banda (MHz-Km)		400-600
diámetro del núcleo (um)	9	50
diámetro del revestimiento (um)	125	125
diámetro de la protección (um)	250	250



### Características del cable<sup>1</sup>

	MEDIA CAPACIDAD	ALTA CAPACIDAD
número de tubos <sup>2</sup>	6	6
refuerzo central	metálico o dieléctrico	
número total de fibras	4,6,8,10,12	14,16,18
diámetro total (mm)	15	16.5
peso dieléctrico/armado (Kg/Km)	145/205	205/255
radio de curvatura mínimo (mm)	300	
tensión máxima permitida (Kg) <sup>3</sup>	100	
resistencia a la compresión (Kg)	3000	
temperatura de operación (°C)	-10 a 50	

1 Datos nominales sujetos a tolerancias de manufactura.

2 Uno o dos tubos pueden ser sustituidos por elementos de relleno.

3 Aplicada sobre el elemento de tracción.

Cable troncal de fibras ópticas para instalarse directamente enterrado.

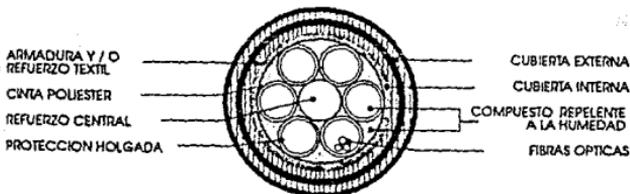
Cable de 24 a 36 fibras ópticas monomodales o multimodales dentro de tubos de color, que contienen un compuesto repelente a la humedad, dichos tubos se cablean en forma helicoidal al rededor de un elemento de tracción metálico o dieléctrico y se unen con cinta e hilos cubiertos con polietileno. Se protege con doble armadura de acero y polietileno.

Se usa entre puntos de alta densidad de comunicaciones, como grandes centrales telefónicas, radiofónicas, televisivas y de cómputo y en áreas de alto riesgo o interferencia electromagnética, sin necesidad de instalar ductos soterráneos, charolas ni postería. Es recomendado como medio de enlace físico para larga distancia (interciudades).



**Características de las fibras ópticas.**

	monomodo	multimodo
Atenuación(db/Km)	0.5	0.3
Apertura numérica		0.2 ± 0.02
Longitud de onda de corte(nm)	1130-1280	
Ancho de banda (MHz·Km)		400-800
Diámetro del núcleo (µm)	8.7	50



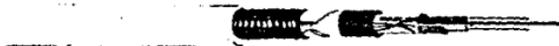
**Características del cable.**

	Construcción
Diámetro total (mm)	19
número total de fibras	12
Peso (Kg/Km)	370
Radio de curvatura mínimo(mm)	300
Tensión máxima permitida (Kg)	300
Resistencia a la compresión (Kg)	3000
Temperatura de operación (°C)	-10 a 50

Cable óptico troncal con bajo número de fibras.

Cable de 2,3 ó 4 fibras ópticas monomodo o multimodo, cada una de las cuales está dentro de una protección termoplástica en forma de tubo, los cuales están cableados helicoidalmente alrededor del elemento de tracción metálico o dieléctrico. El cable se impregna con una sustancia repelente a la humedad y se reúne con hilos y cinta. Se aplica cubierta interna de polietileno y forro textil de refuerzo y armadura de acero corrugado. Se extrae cubierta externa de polietileno.

Es usado entre puntos con bajo volumen de comunicaciones, como redes de enlace local, pequeñas centrales telefónicas, microondas, etc. Se usa en áreas de alto riesgo o interferencia electromagnética. El cable es absolutamente inmune a inducción el armado resiste condiciones adversas como humedad, agentes químicos, roedores, etc.

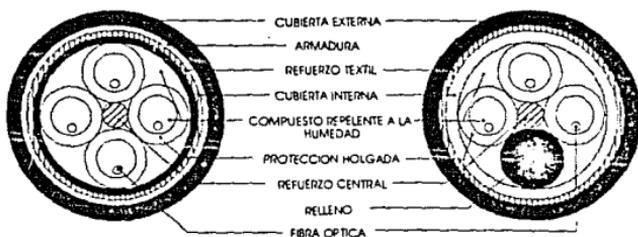


### Características de las fibras ópticas

	unimodal	multimodal
Atenuación (dB/Km)	0.5	3.0
Apertura numérica		$0.2 \pm 0.02$
Longitud de onda de corte (nm)	1130-1280	
Ancho de banda (MHz·Km)		400-800
Diámetro del núcleo (µm)	8.7	50

TETRATEL REFORZADO 4 F.O.

TETRATEL DIELECTRICO 3F.O.



Número de fibras	1 a 4
Diámetro total dieléctrico (mm)	11.0
Peso dieléctrico (Kg/Km)	100
Radio de curvatura mínimo (mm)	170
Tensión máxima permitida (Kg)	100
Resistencia a la compresión (Kg)	500
Temperatura de operación (°C)	-10 a 50

## CONCLUSIONES.

El objetivo de este trabajo fué dar a conocer las características y parámetros que intervienen en el funcionamiento de los sistemas de comunicación por fibras ópticas, lo cual hemos analizado en forma general, de modo que se dé una perspectiva elemental de este tema; Este , puede ser complementado con los textos que aparecen en las referencias que aquí presentamos, o en otras fuentes informativas.

Los ejemplos que incluimos de la aplicación de las fibras ópticas, nos muestran un panorama bastante amplio de los campos de aplicación de estas, que en resumen son: Telefonía; Televisión por cable y circuito cerrado; Señalización y telecontrol en zonas de alta interferencia; Interconexión de computadoras y terminales.

Sin embargo, los sistemas de fibras ópticas no sólo tienen aplicaciones a gran escala, sino que también es posible tener circuitos más simples que las usen, esto quedó demostrado al presentar el diseño de un circuito básico de transmisión de datos ( capítulo IX), este circuito puede construirse sin dificultad ya que sus componentes se encuentran en el mercado nacional.

En la actualidad, se llevan a cabo ambiciosas investigaciones para efectuar grandes proyectos, como el que se pondrá en marcha en la red telefónica de nuestro país (TELMEX); Este proyecto consiste en la estructuración de la red digital de servicios integrados, con la que se tendrá mayor versatilidad

de servicios; Tales como el video-teléfono, acceso a diversas computadoras para servicios bancarios, reservaciones de viajes en avión, tren, barco y en hoteles, catálogos y compras en tiendas departamentales, periódico en nuestra pantalla de televisión programas televisivos y juegos por computadora, así como otros servicios de comunicación. Existen ya salas dedicadas a teleconferencias, donde un grupo de ejecutivos tiene juntas de trabajo a distancia, pudiendo verlos en pantallas de televisión e intercambiando datos y documentos a distancia.

El desarrollo tecnológico de las fibras ópticas es constante y acelerado, su capacidad vá en aumento y las pérdidas van disminuyendo, de modo que para la siguiente década se espera - cruzar el océano atlántico sin utilizar repetidores intermedios y además tener una red submarina en el pacífico, con algunos repetidores, enlazando Australia, Oceanía, Hawai, Singapur y Japón.

La miniaturización continua de la electrónica, junto con el avance tecnológico de las fibras ópticas, nos llevará en poco tiempo a vivir una epoca de satisfacciones tecnológicas maravillosas.

## REFERENCIAS.

- 1.- "Optical fibers communications".  
G. Keiser. / Mc. Graw Hill 1984.
- 2.- "Receiver design for digital optic communications".  
S.D. Personick, / Bell System Technical Journal 1983.
- 3.- "Logic Data Book I".  
National. 1984.
- 4.- "COS/VOS Integrated Circuits".  
RCA. 1981.
- 5.- "Operational Amplifiers".  
Tobey, Huelsman / Mc. Graw Hill. 1981.
- 6.- "Optical fiber cable systems".  
Herb Lubaris ( General Cable Company). 1981.
- 7.- "Cable design, testing and instalation".  
P.R.Bark, D.O.Lawrence (Siecorm Co.). 1982.
- 8.- "Techniques for installing fiberoptic connectors".  
Artículo de Canoga Data Systems. 1987.

- 9.- "Fiber optics. Components, systems and accessories".  
Math Associates Inc. 1980.
- 10.- Folletos e información sobre fibras ópticas.  
Condumex (División comunicaciones). 1987.
- 11.- Telecomunicaciones vfa fibras ópticas, teoría y aplicaciones.  
Apuntes de la División de Educación Continúa, de la  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1983.