

24.8
ZONA DE TV DIGITALEC
NOVA LEGIS UNI SERE



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**SISTEMA DE COMUNICACIONES
POR FIBRA OPTICA**

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n :

Ma. Guadalupe Arellano Martínez

Antonio Canchola Cruz

Rafael Gatica Sánchez

Manuel García Sánchez

Juan Carlos Sedeño Simontes



México, D. F.

1988



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

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: FIBRAS OPTICAS	9
Clasificación de las fibras ópticas	11
Apertura Numérica	11
Atenuación	15
Microcurvaturas	22
Curvaturas	23
Dependencia de la atenuación a la temperatura	24
Fabricación de las fibras ópticas	25
Cables	36
Empalmes y conectores	43
Acopladores	56
CAPITULO 2: TRANSMISORES	61
Fuentes ópticas	62
Circuitos Excitadores	87
CAPITULO 3: RECEPTORES	94
Fotodetectores	95
Circuitos Excitadores	111
CAPITULO 4: REPETIDORES	117

CAPITULO 5: MODULACION Y MULTIPLEXAJE	123
Modulación	123
Multiplexaje	142
CAPITULO 6: CONSIDERACIONES GENERALES DE UN DISEÑO DE SISTEMA DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA	151
Diseño del receptor	155
Especificaciones del cable de fibra óptica	159
Diseño del transmisor	162
CAPITULO 7: MEDICION DE PARAMETROS DE TRANSMISION EN FIBRAS OPTICAS	167
Métodos de medición de la atenuación	171
Métodos de medición del ancho de banda	183
Detección y localización de fallas en las fibras	191
CAPITULO 8: CARACTERISTICAS GENERALES DE OTROS SISTEMAS DE COMUNICACION	195
Cable coaxial	196
Par de cobre	198
Radio enlace	199
CAPITULO 9: PERSPECTIVAS DE LAS FIBRAS OPTICAS EN MEXICO	205

CAPITULO 10: MODELO DE UN SISTEMA OPTICO DE	
COMUNICACION	212
Transmisor	213
Receptor	217
Repetidor	221
Medio de transmisión	223
CONCLUSIONES	224
APENDICE A: OPTICA	229
APENDICE B: REDES DE SERVICIOS INTEGRADOS	
CON FIBRA OPTICA	246
BIBLIOGRAFIA	

I N T R O D U C C I O N

La necesidad de transmitir información de un lugar a otro, desde los inicios de la humanidad, ha llevado al hombre a desarrollar a través de las distintas civilizaciones, una gran variedad de sistemas de comunicación; desde los tambores y señales de humo, hasta los satélites de telecomunicaciones y las fibras ópticas. En cada nuevo sistema, se ha buscado lograr la transmisión de información de la forma más óptima, es decir, que se haga de la manera más rápida posible, sea de alta confiabilidad y se tenga una mayor capacidad de envío.

En la actualidad, los sistemas de comunicación por fibra óptica han adquirido una atención relevante, tanto en estudios teóricos como en aplicaciones prácticas, debido a las características tan especiales de estos sistemas. Estas características ofrecen grandes ventajas técnicas sobre otros sistemas de comunicaciones en determinadas aplicaciones. Un impulso decisivo para el empleo masivo de fibras ópticas lo dará la introducción de las comunicaciones de banda ancha, por ejemplo: la videotelefonía.

No obstante el escaso desarrollo de los dispositivos de fibra óptica, sus antecedentes se remontan a muchos años atrás. Es probable que una gran cantidad de personas observará la propagación

de luz mediante fibras ópticas, mucho antes de que se hiciera cualquier uso práctico del fenómeno. Por ejemplo, en los trabajos de vidrio veneciano que datan de la época renacentista.

La primera demostración aceptada de que la luz sigue a un medio transparente curvo, es acreditada a John Tyndall, en 1870. Durante una conferencia ante la Sociedad Real Inglesa, Tyndall mostró este fenómeno.

En 1880, Alexander Graham Bell llevó a cabo un considerable número de experimentos con un dispositivo llamado fotófono. El mismo Bell consideró que el fotófono era un invento más importante que el teléfono, debido a que no requería de cables para enlazar el transmisor con el receptor. Desafortunadamente, el fotófono no estaba adelantado a su tiempo, ya que la tecnología adecuada para su desarrollo no estaba disponible en dicha época.

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

Prácticamente, este campo se abrió hasta los años 50's, cuando Van Heel, Hopkins y Kapany desarrollaron el fibriscopio flexible. En este trabajo, Kapany desarrolló la primera fibra óptica.

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

En lo referente a las comunicaciones faltaban, sin embargo, elementos fundamentales que iniciarán un desarrollo más acelerado de este tipo de sistemas. Un suceso importante, fue la invención del LASER (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación) por Townes, en 1958. Con este descubrimiento, se pudo satisfacer la necesidad de disponer de una fuente electroluminiscente que fuera capaz de acoplar un nivel de potencia importante en el interior de las delgadas fibras, también, trajo consigo un estudio más formal sobre la potencialidad de transmitir información a frecuencias mucho más elevadas dentro del espectro electromagnético (ver Fig. I).

A este desarrollo siguió una serie de experimentos, hasta que, en 1967, las pérdidas en fibras fueron reportadas en 1 000 dB/Km. En 1970, Kapson, Keck y Mauren anunciaron un importante progreso con fibras de menos de 20 dB/Km de atenuación. En la actualidad existen fibras ópticas con pérdidas de 0.5 dB/Km, y de menos en experimentación. El desarrollo de fibras ópticas ultradelgadas y de bajas pérdidas, capaces de transmitir ondas de luz a grandes distancias, constituye uno de los avances más importantes de los últimos tiempos en este campo.

Además de los adelantos en la fabricación de las fibras ópti-

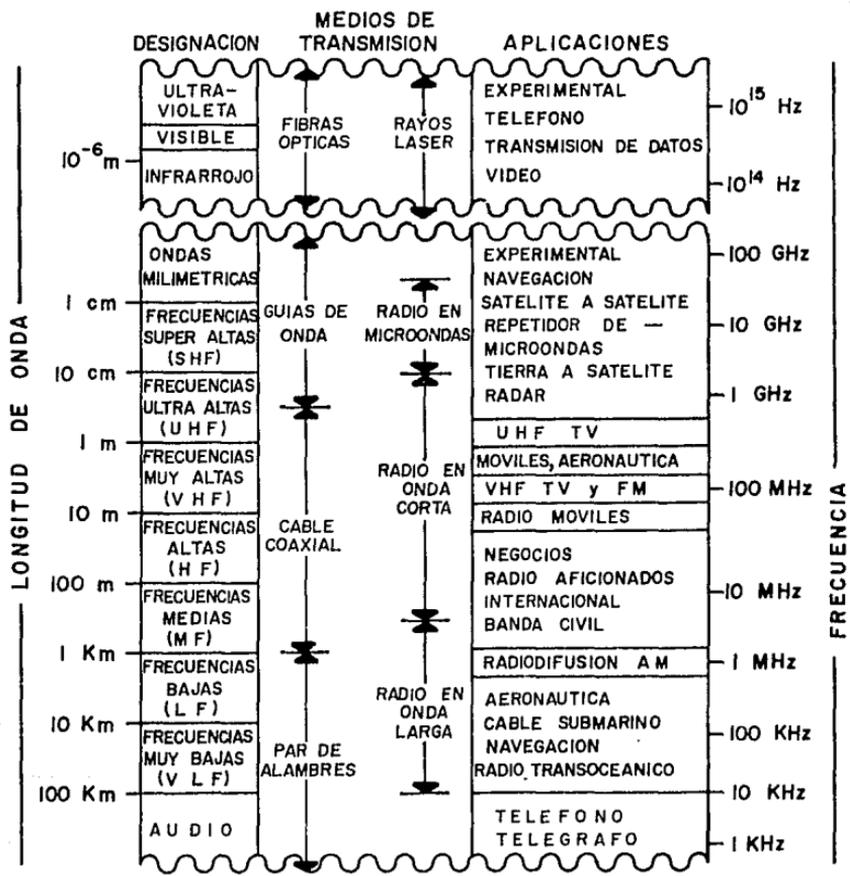


FIG. I.- ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

cas, los fabricantes de equipos de telecomunicaciones ofrecen transmisores y receptores que introducen en su constitución una generación totalmente nueva de dispositivos ópticos compactos, capaces de guiar con gran precisión la luz de un LASER; por lo que la obtención de microcircuitos ópticos es ya una realidad.

Así mismo, gran número de firmas fabricantes de conectores ofrecen sus productos para acoplar transmisores y receptores a las fibras.

En términos económicos, las ventajas de las fibras ópticas podrán verse a futuro. El gasto en el equipo terminal requerido para transmisión por fibra óptica decrecerá muy rápidamente, sobre la curva típica de los dispositivos de estado sólido. Para los cables, es previsible un decremento acelerado de los costos. Si la operación de la fibra de vidrio sigue la historia de crecimiento del cristal de silicón, se espera que el costo de las fibras caiga rápidamente, al producirse grandes volúmenes de fibra, disminuyendo el costo de capital de la planta y los costos de investigación y desarrollo.

En la Fig. II se muestran, en forma esquemática, las características, ventajas y aplicaciones de las fibras ópticas como medio de transmisión. Así mismo, se muestra la constitución básica de un sistema de comunicación por fibra óptica en la Fig. III. Dicho sistema, describiéndolo de forma general, se constituye de un transmisor óptico (Círculo excitador y Fuente electroluminiscente: LED o Diodo LASER), de fibra óptica (Multimodo o Unimodo) y de un receptor óptico (Fotodetector: Fotodiodo PIN o APD y Am-

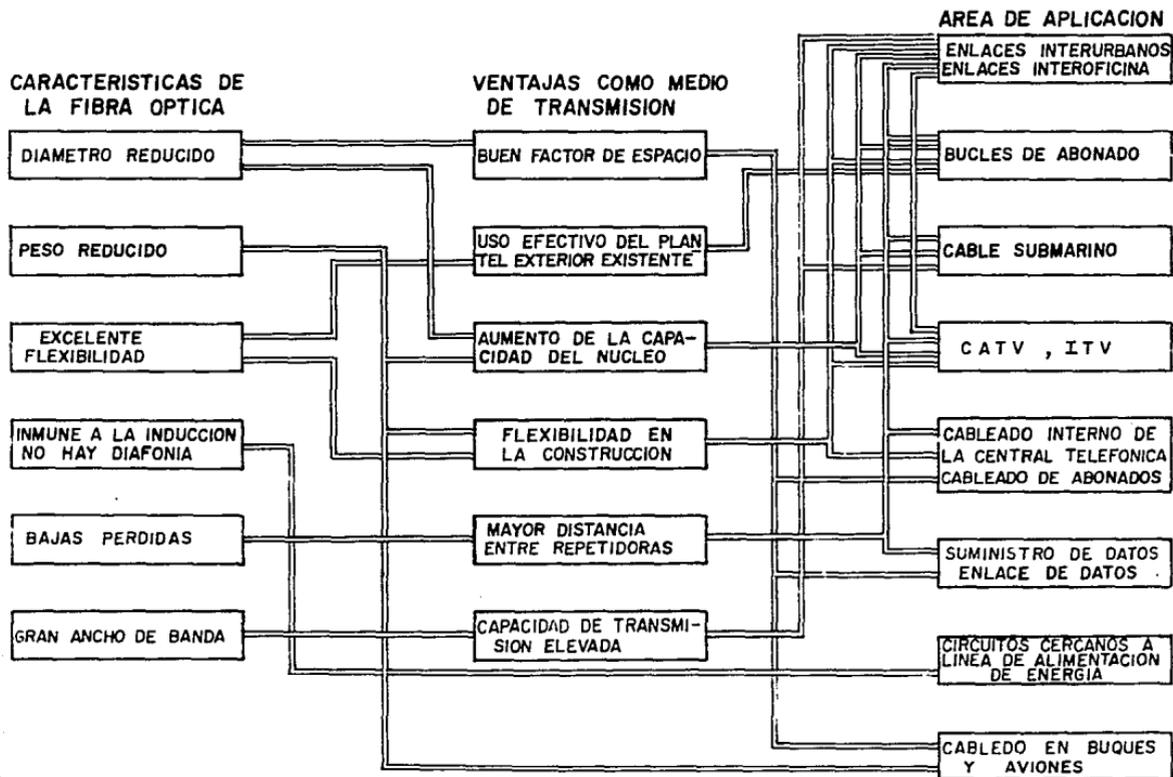


FIG. II - TRANSMISION POR FIBRA OPTICA Y SUS APLICACIONES

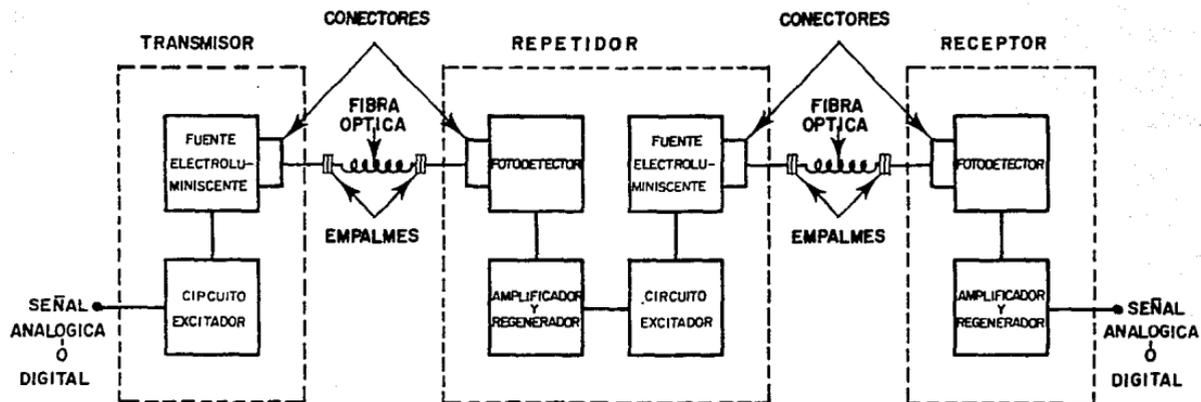


FIG. III.-DIAGRAMA A BLOQUES DE UN SISTEMA DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA.

plificador/Regenerador). Dependiendo de la atenuación en la fibra óptica, la longitud de transmisión, la intensidad de la señal y de otros factores, los repetidores pueden o no ser necesarios en el sistema.

En conclusión, se puede decir que las aplicaciones de los sistemas de transmisión por fibra óptica, de acuerdo a las características expuestas, se están desarrollando con excelentes resultados, ya que permitirán una serie de nuevos servicios de banda ancha tales como: Facsímil de alta velocidad y telecopia, Teletex, Videotex, Telefonía visual (Videotelefonía) y Redes integradas de comunicación.

C A P I T U L O 1

F I B R A S O P T I C A S

La creciente demanda por sistemas de comunicación más eficientes ha obligado a un estudio exhaustivo de diversas alternativas. Dentro de éstas, se ha encontrado que una de las soluciones con mayor porvenir en la actualidad, es el sistema de comunicaciones por medio de fibras ópticas.

Una fibra óptica, es un filamento dieléctrico empleado como guía de onda para la conducción de energía luminosa en forma de ondas electromagnéticas a longitudes de onda específicas.

En su estructura más simple la fibra óptica está compuesta de tres capas concéntricas (Fig. 1-1):

- 1) Núcleo
- 2) Revestimiento
- 3) Envoltura

El núcleo es la región donde se propaga la luz; el revestimiento actúa como zona reflectora y la envoltura es una capa adi

cional de protección.

La forma de propagación de los rayos luminosos a lo largo de la fibra depende de la incidencia de éstos a la entrada y del tipo de fibra utilizada. Los rayos pueden ser meridionales u oblicuos. Los primeros, en su propagación están confinados en un plano meridional (plano que contiene al eje de la fibra), en tanto que la trayectoria de propagación de los segundos no está confinada a un solo plano, por lo que estos rayos no son paralelos al eje ya que su transmisión es por medio de reflexiones internas siguiendo una determinada trayectoria helicoidal.

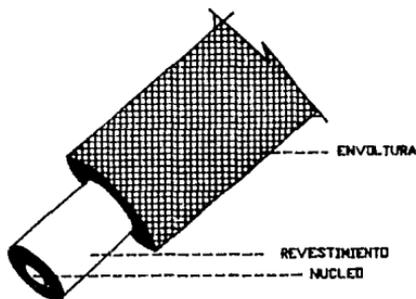


FIG. 1-1 ESTRUCTURA DE UNA FIBRA OPTICA

CLASIFICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS

Los rayos de luz son conducidos a través del núcleo debido a la diferencia en índices de refracción del núcleo y revestimiento. El índice de refracción puede disminuir del revestimiento al núcleo por pasos, como en la fibra con índice escalonado, en la que el índice de refracción del núcleo de la fibra es constante; o hacerlo gradualmente, en cuyo caso el índice de refracción decrece gradualmente del centro a la frontera núcleo-revestimiento, como en la fibra con índice gradual.

En el apéndice A se analiza en forma más amplia la forma en que se transmite la luz a través de la fibra óptica.

Existen tres tipos de fibras ópticas que son actualmente utilizadas en las telecomunicaciones (Fig. 1-2):

- fibra con índice escalonado (tipo multimodo)
- fibra con índice gradual (tipo multimodo)
- fibra de modo único (tipo índice escalonado)

En la fibra de modo único o unimodo el diámetro del núcleo es tan pequeño que solo existe un modo de propagación.

APERTURA NUMERICA

La apertura numérica (N.A.) determina la eficiencia del aco-

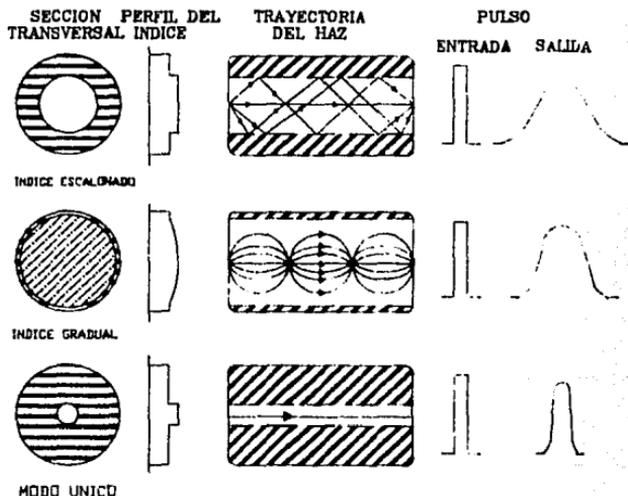
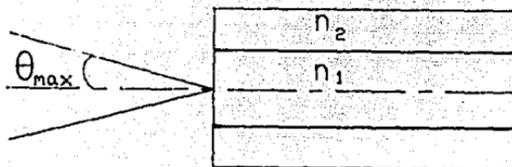


FIG. 1-2 TIPOS DE FIBRAS

plamiento entre una fuente electroluminiscente y la fibra (Fig. 1-3). Su valor varía de acuerdo al tipo de excitación y al modo de transmisión (analógico o digital).

En la figura θ_{\max} es el valor del máximo ángulo con el eje de la fibra, que puede tener la luz incidente a fin de que exista una reflexión interna total.

La apertura numérica determina el cono de aceptación, que es el máximo ángulo sólido por el cual la fibra acepta la potencia luminosa (Fig. 1-4).



$$NA = \text{sen } \theta_{max}$$

FIG. 1-3 APERTURA NUMERICA

La aceptación nos dice que cantidad de luz puede ser introducida a la fibra. Es proporcional a la sección transversal del núcleo y al cuadrado de la apertura numérica, y también depende del tipo de fibra (índice gradual o escalonado).

Las ecuaciones de la apertura numérica para los dos tipos de fibra son:

Índice escalonado

$$N.A. = n_1 (2\Delta)^{1/2}$$

Índice gradual

$$N.A. = N.A. (0) \{1 - (r/a)^{\gamma}\}^{1/2}$$

donde:

n_1 = Índice de refracción del aire

$$\Delta = \frac{n_n - n_c}{n_n}$$

n_n = Índice de refracción del núcleo

n_c = Índice de refracción del revestimiento

N.A.(0) = Apertura numérica en el eje de la fibra considerándolo índice escalonado

r = Distancia al eje del punto a analizar

a = Radio del núcleo

γ = Perfil de la fibra

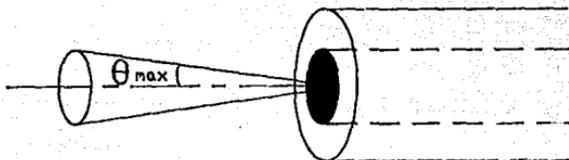


FIG. 1-4 CONO DE ACEPTACION

El perfil de la fibra es un parámetro que nos indica como varía el índice de refracción conforme nos alejamos del núcleo. De ésta manera si $\gamma=2$, se tiene un perfil parabólico (Fig. 1-5).



FIG. 1-5: PERFIL PARABOLICO

ATENUACION

La atenuación es un parámetro que nos indica las pérdidas de potencia luminosa a lo largo de la fibra. Este parámetro se mide normalmente en dB/Km a una determinada longitud de onda (Fig. 1-6).

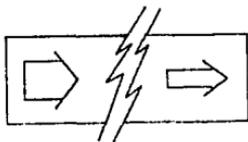


FIG. 1-6 ATENUACION

La atenuación de la señal está definida como la relación de potencia óptica de salida P_s , en una fibra de longitud L , a la potencia óptica de entrada P_e ; y se determina por la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_e}{P_s} \quad (\text{dB/Km})$$

Las pérdidas de atenuación en las fibras ópticas son causadas por la absorción y dispersión del material.

Factores que contribuyen a la absorción:

- Absorción infrarroja, IR
- Absorción OH (hidróxido, humedad)
- Iones metálicos
- Daños por tracción
- Absorción ultravioleta, UV

Factores que contribuyen a la dispersión:

- Dispersión de Rayleigh
- Fallas de homogeneidad, imperfecciones
- Irregularidades en el diámetro del núcleo, curvaturas abruptas

-Absorción

La absorción del material es causada por los iones OH y la

transición de iones metálicos en el vidrio. La dispersión de la guía de onda es causada principalmente por las irregularidades geométricas en la interface núcleo-revestimiento. Los procedimientos de fabricación controlados cuidadosamente pueden mantener las pérdidas de dispersión de la guía de onda, menores a 0.5 dB/Km. Las pérdidas por radiación son causadas por las curvaturas de la fibra, particularmente aquellas de radio pequeño.

Para minimizar las pérdidas de la fibra son deseables ciertas propiedades del material de la guía de onda; primero es obtener una baja concentración de impurezas (principalmente de aquellas cuya absorción está entre el visible y cercano infrarrojo), segundo controlar la combinación de las propiedades dieléctricas de los componentes (especialmente en vidrios multicomponentes) para minimizar la dispersión por las fluctuaciones del compuesto, y tercero, obtener una transición pequeña de temperatura del cristal para minimizar las fluctuaciones de densidad causada por la pérdida de componentes volátiles y para reducir la ampliación de la banda de absorción ultravioleta.

Los efectos de contaminación por ciertas transiciones de los elementos en la fibra pueden controlarse optimizando el estado redox (reducción-oxidación) del vidrio, llevando a cabo un balance de los efectos de los iones del metal en varios estados de oxidación. Para el diseño de un sistema de transmisión específico, la composición de la fibra puede optimizarse para un ancho de banda en particular con el objetivo de transmitir la luz a través de la fibra de la mejor manera posible.

La principal impureza de interés para el silicio en la guía de onda óptica es el radical OH, que tiene débiles bandas de absorción en 725, 825 y 875 nm y una fuerte banda de absorción en 950 nm.

La Fig. 1-7 muestra la relación de la atenuación de la fibra contra la longitud de onda para pequeñas pérdidas típicas de la fibra.

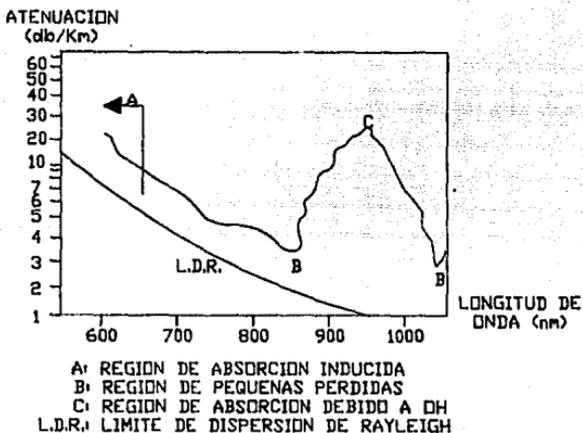


FIG. 1-7 PERDIDAS TÍPICAS DE LA FIBRA

Para minimizar la banda de absorción debido a los iones OH en las fibras, los materiales de fabricación son frecuentemente calentados y secados en áreas de producción controladas de muy poca humedad. La limitación de usar materiales completamente secos

en la manufactura de las fibras, generan defectos que producen absorción debido a la imperfección en el control del medio ambiente a lo largo del proceso de fabricación.

-Dispersión

Los dos tipos de dispersión en guías de onda ópticas son la dispersión modal y la dispersión material, ambos son factores que limitan la capacidad de transmisión.

Dispersión modal

La luz entra a la fibra formando un ángulo diferente al formado con el eje central (Fig. 1-8), tardándose más en recorrer transversalmente a la fibra debido a que sufre numerosas reflexiones internas por unidad de longitud.

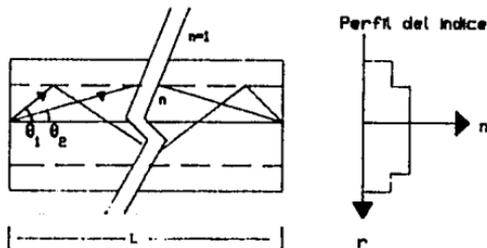


FIG. 1-8 DISPERSION MODAL DE UNA FIBRA CON INDICE ESCALONADO

La diferencia en la distancia total recorrida por el rayo del eje central al eje distante provoca un retardo que amplifica al pulso de entrada. Esta dispersión del pulso limita el ancho de banda y por tanto, la capacidad de transmisión de información de cualquier fibra.

Graduando cuidadosamente el cambio del índice de refracción entre el revestimiento y el eje del núcleo, el ensanchamiento del pulso puede minimizarse. Esto disminuye la longitud diferencial de la trayectoria efectiva entre modos de orden alto y bajo, puesto que rayos con mayor ángulo viajan más rápido a través de la porción de material de la guía de onda con menor índice de refracción, reduciendo de esta manera el tiempo de retardo.

La dispersión modal en fibras multimodo puede reducirse haciendo la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento menor a 0.007, esto sin embargo hace que el acoplamiento de la luz de entrada sea muy difícil.

En fibras unimodo, solo un modo de propagación es posible por lo que la dispersión modal no existe.

Dispersión material (Dispersión cromática)

Un pulso de luz está compuesto por rayos de diferentes longitudes de onda, dependiendo del ancho espectral de la fuente luminosa. Lo anterior, provoca que el índice de refracción varíe levemente como se observa en la Fig. 1-9.

Esto es cierto para todos los tipos de fibra y hace que la velocidad de propagación dependa un poco de la longitud de onda

(Fig. 1-10).

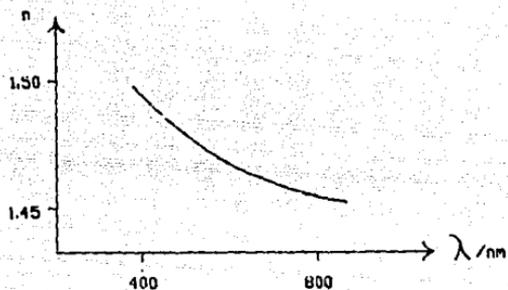


FIG. 1-9 DEPENDENCIA DEL INDICE DE REFRACCION CON LA LONGITUD DE ONDA

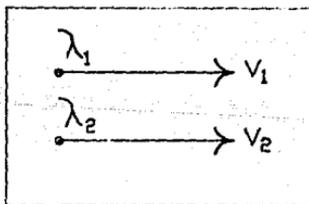


FIG. 1-10 DISPERSION MATERIAL

La dispersión material limita el ancho de banda de la fibra, pero puede ser reducida empleando luz monocromática, como por e-

jemplo, la generada por un diodo LASER.

MICROCURVATURAS

Las microcurvaturas son defectos consistentes en pequeñas alteraciones en la posición del eje de la fibra. Estas pueden deberse a variaciones de temperatura, cuando la fibra y el recubrimiento tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica. Las microcurvaturas también se presentan como resultado de esfuerzos mecánicos. Estas microcurvaturas son especialmente desfavorables cuando sus longitudes son menores a 1 mm (Fig. 1-11).

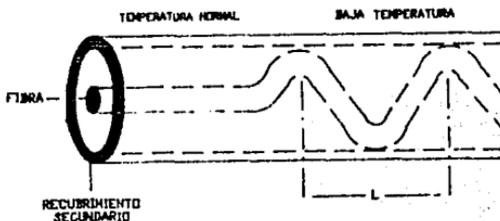


FIG. 1-11 MICRO CURVATURAS

Las pérdidas ópticas se deben al acoplamiento modal, cuando modos que forman ángulos pequeños con el eje de la fibra, cam-

bían en modos con ángulos tan grandes que no pueden mantenerse dentro de la fibra, ya que exceden el máximo ángulo permisible de aceptación, aumentando de esta forma la atenuación.

CURVATURAS

Debido a que el ángulo de incidencia " i " para muchos rayos de crece considerablemente en una curvatura, no se alcanza la condición para la reflexión interna total y muchos rayos abandonan el núcleo (Fig. 1-12). Estas pérdidas serán notables si el radio de curvatura " R " es menor que 5-10 mm.

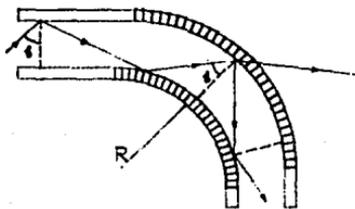


FIG. 1-12 CURVATURAS

DEPENDENCIA DE LA ATENUACION A LA TEMPERATURA

Cuando se excede el rango máximo de temperatura permitido, pueden ocurrir cambios irreversibles en las propiedades de transmisión de la fibra (Fig. 1-13).

La atenuación puede incrementarse en diversas magnitudes de 0 °C a -40 °C, si el cable de fibra no ha sido construido en forma adecuada.

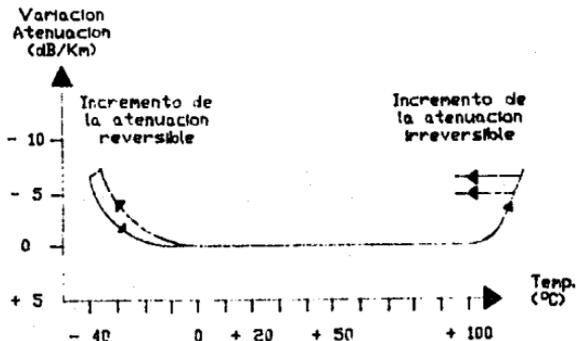


FIG. 1-13 DEPENDENCIA DE LA ATENUACION RESPECTO A LA TEMPERATURA (CABLE)

Cuando la temperatura disminuye, teniendo la fibra un revestimiento de plástico en lugar de vidrio, el índice de refracción del revestimiento tiende a aumentar más rápidamente que el del

núcleo. Así la apertura numérica disminuye y en consecuencia aumenta la sensibilidad para las pequeñas curvaturas, con el resultado de mayores pérdidas.

FABRICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS

La fabricación de fibras ópticas de vidrio se realiza por dos tipos de procedimiento: crisol y preforma. El primero se utiliza en fibras con aplicaciones de corto alcance y baja velocidad de información, y el segundo se aplica en fibras para telecomunicaciones a 34 Mbps (480 canales), 140 Mbps (1920 canales) o capacidades superiores.

Las diferentes tecnologías de manufactura de fibras ópticas radican básicamente en la preforma, la cual es una técnica que comprende las siguientes etapas:

- a) fabricación de la preforma
- b) estiramiento de la preforma

Los métodos más usados en la fabricación de fibras por preforma son:

- a) VAD (Vapour-phase Axial Deposition)
- b) OVD (Outside Vapour Deposition)
- c) MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition)

d) PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition)

-Método VAD

El crecimiento de la preforma se realiza en la dirección axial (Fig. 1-14). Partiendo de una varilla de alimentación dispuesta perpendicularmente, se inyectan las materias primas dopantes; éstas reaccionan hasta formar finas partículas de vidrio y los productos se depositan en el orden y proporción adecuada al perfil del índice deseado.

El crecimiento da lugar a una preforma porosa, que sometida a un calentamiento se contrae hasta formar la preforma definitiva.

Los parámetros de transmisión de las fibras manufacturadas por este método se muestran en la Tabla 1-1 para la primera, segunda y tercera ventana. *

* Se llama ventana, a una región en el espectro de la fibra óptica para la cual la luz se propaga con atenuación mínima. En el caso de la fibra óptica de Si existen tres ventanas.

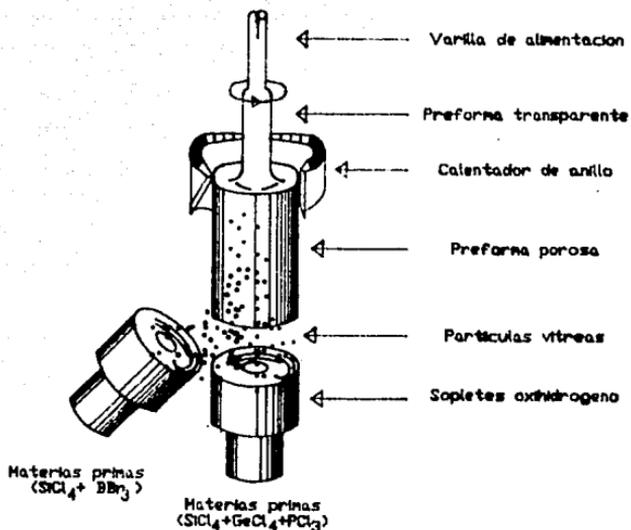


FIG. 1-14 METODO VAD

FIBRA	MULTIMODO			MONOMODO	
	0.85	1.3	1.55	1.3	1.55
LONGITUD DE ONDA (λ m)	0.85	1.3	1.55	1.3	1.55
ATENUACION (dB / Km)					
VALOR TIPICO	2.4	0.70	0.50	0.50	0.35
VALOR OPTIMO	2.2	0.42	0.29	0.33	0.22
ANCHO DE BANDA (MHz-Km)					
VALOR TIPICO	—	1300	—	> 10000	> 10000

TABLA 1-1 CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS FABRICADAS CON EL METODO VAD

-Método OVD

En este método la preforma se realiza en dos fases: deposición de los óxidos y colapsado. En la primera, los vapores se depositan lateralmente sobre un mandril de grafito o de Al_2O_3 de unos 5 mm de diámetro y que gira a velocidad constante; la llama se va trasladando a lo largo del mandril, produciendo las capas vítreas que darán lugar al perfil del índice deseado. Acabado este proceso, se retira el mandril y se realiza el colapsado, introduciendo la preforma en un horno a 1 500 °C en una atmósfera de helio con un pequeño porcentaje de Cl_2 , con objeto de eliminar la contaminación de grupos OH (ver Fig. 1-15).

En las fibras de índice gradual, el núcleo está compuesto de unas 1 000 capas finas de vidrio.

Las características de las fibras utilizando este método son mostradas en la Tabla 1-2.

F I B R A	MULTIMODO		MONOMODO	
	LONGITUD DE ONDA (λ m)	0.85	1.3	1.3
ATENUACION (dB/Km) VALOR TIPICO	2.4	0.9	0.40	0.25
ANCHO DE BANDA(MHz-Km) VALOR TIPICO	800	800	>10000	>10000

**TABLA 1-2 CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS
FABRICADAS CON EL METODO OVD**

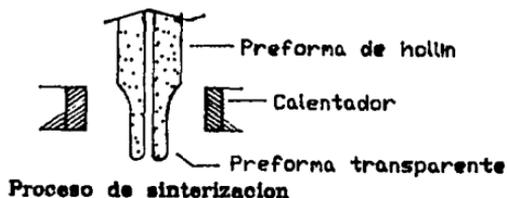
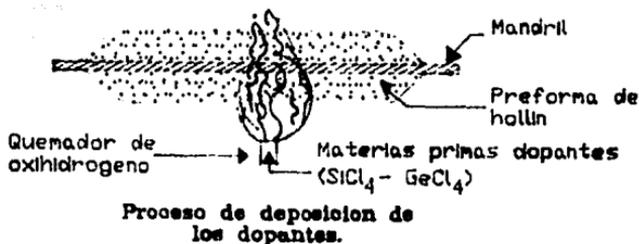


FIG. 1-15 METODO OVD

-Método MCVD

Este método se esquematiza en la Fig. 1-16. El proceso parte de un tubo de sílice muy puro en el que se va depositando SiO_2 junto con otros óxidos dopantes, procedentes de haluros evaporados. El tubo de sílice se calienta por medio de unos mecheros que circulan de izquierda a derecha. En la zona calentada se produce una reacción de los óxidos en fase de gas, dando lugar a la formación del núcleo de la preforma, gracias a la sucesiva constitución de finas capas de SiO_2 convenientemente dopadas.

Una vez depositado el material del núcleo se eleva la temperatura a 1 900 °C, y debido a la tensión superficial, el tubo se colapsa y forma el cilindro macizo de vidrio que constituye la preforma.

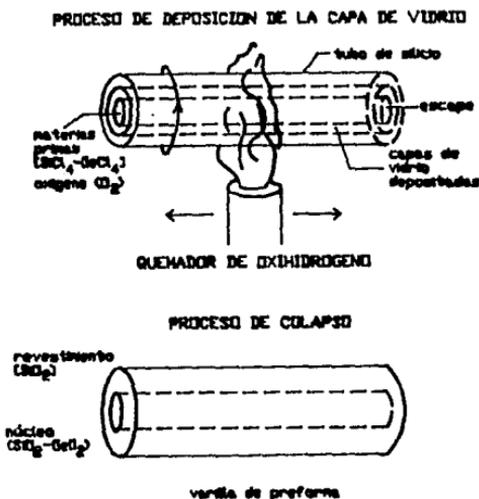


FIG. 1-16 METODO MCVD

La Tabla 1-3 muestra las características de transmisión de las fibras ópticas elaboradas por este método.

F I B R A	MULTIMODO		MONOMODO	
	LONGITUD DE ONDA (λ m)	0.85	1.3	1.3
ATENUACION (dB/ Km)				
VALOR MEDIO	2.5	0.8	0.40	0.22
DOBLE VENTANA	3.41	1.2	—	—
ANCHO DE BANDA (MHz-Km)				
VALOR MEDIO	21600	1800	>10000	>10000
DOBLE VENTANA	680	840	—	—

TABLA 1-3 CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS
FABRICADAS CON EL METODO MCVD

-Método PCVD

En este método se realiza una deposición en el interior de un tubo de sílice, y utiliza plasma no isoterma para iniciar la reacción de los gases.

El método se esquematiza en la Fig. 1-17. Un sistema inyecta las materias primas en forma de gas, y éste se mantiene a una presión de aproximadamente 10 Torr dentro del tubo de sílice, el cual se encuentra dentro de un horno a unos 1 200 °C. Dentro del horno se instala un resonador de microondas que tiene un desplazamiento de izquierda a derecha, sobre una longitud de un metro.

La energía de radiofrecuencia, de 2 GHz, genera un plasma dentro del tubo, que inicia un proceso heterogéneo de reacción en el interior de las paredes del mismo. La eficiencia de la deposición es del 100% para el SiO_2 y del 85% para el GeO_2 . Finalizada la deposición del núcleo, tiene lugar el colapsado a unos 200 °C.

Mediante este proceso, la energía se acopla directamente al plasma sin que las paredes del tubo de sílice puedan producir un retardo térmico. De éste modo el resonador puede desplazarse a velocidades de 7 m/min, depositando unas 700 capas de vidrio de unos 0.05 mm de espesor, con un índice de refracción determinado.

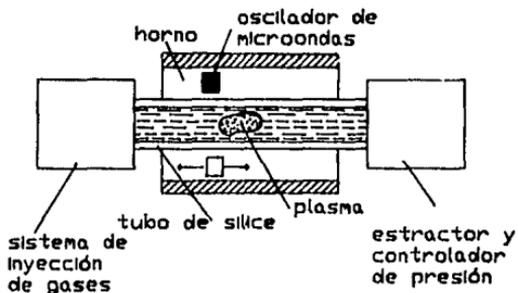


FIG. 1-17 METODO PCVD

Las características de las fibras utilizando este método se dan en la Tabla 1-4.

F I B R A	MULTIMODO		MONOMODO	
	LONGITUD DE ONDA (μ m)	0.85	1.3	1.3
ATENUACION (dB/Km) VALOR MEDIO	2.7	0.9	1.0	0.8
ANCHO DE BANDA (MHz-Km) VALOR MEDIO DOBLE VENTANA	1000 1300	>1000 1300	>10000 —	>10000 —

**TABLA I-4 CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS
FABRICADAS CON EL METODO PCVD**

-Estiramiento de la preforma

Una vez terminada la preforma se procede al estiramiento de la misma. La Fig. 1-18 muestra el esquema básico del proceso.

La varilla de preforma se introduce en el horno que está a una temperatura del orden de 2 000 °C en su centro, requiriendo una estabilidad de ± 1 °C a fin de reducir las fluctuaciones en el diámetro de la fibra. Una vez que sale del horno, la fibra pasa por un control de diámetro que debe ser capaz de evitar discrepancias de ± 0.2 μ m, aunque el margen de aceptación más común se halla entre ± 3 μ m y ± 6 μ m.

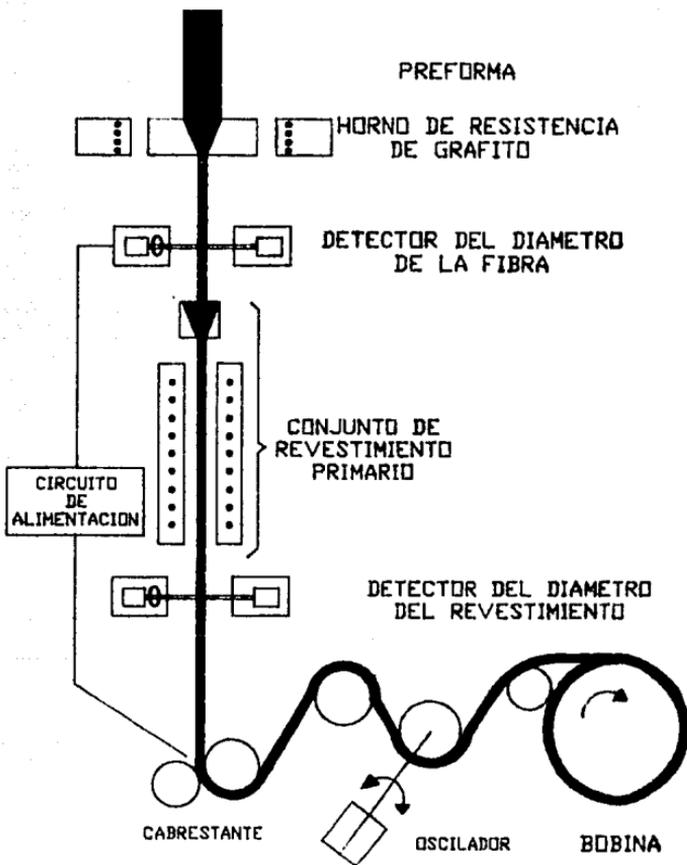


FIG. 1-18 ESTIRAMIENTO DE PREFORMAS

Cualquier alejamiento del margen que se establece, detiene el proceso a través de un circuito de realimentación, paralizando el cabrestante que origina la tensión de estiramiento.

A continuación, se aplica el primer recubrimiento o protección por encima del revestimiento de la fibra. Este primer recubrimiento sirve como protección mecánica a la fibra durante las fases siguientes. Para este recubrimiento suelen emplearse silicones o acrilatos, y los diámetros exteriores oscilan entre $250 \pm 15 \mu\text{m}$ y $500 \pm 25 \mu\text{m}$.

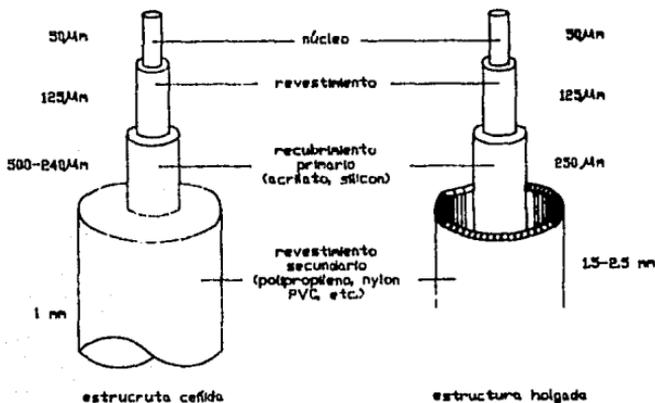


FIG. 1-19 FIBRAS CON RECUBRIMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO

El recubrimiento secundario puede ser de dos tipos: ceñido y holgado (ver Fig. 1-19). El recubrimiento ceñido se realiza mediante un proceso de extrusión con nylon o poliamidas, directamente sobre la fibra. El diámetro exterior es del orden de 1 mm. El recubrimiento holgado, se lleva a cabo por extrusión de un tubo de polipropileno, nylon, PVC, etc. alrededor de la fibra; los diámetros interiores y exteriores del tubo oscilan entre 1.5 y 2.5 mm. La fibra se ubica libremente en el interior del tubo, lo cual hace posible que no se dañe aunque sufra elongaciones posteriores. Además, el tubo suele rellenarse con alguna substancia de baja viscosidad para evitar la entrada de agua o suciedad en el interior del mismo.

CABLES

El diseño del cable de fibra óptica, debe contemplar dentro de sus especificaciones la protección mecánica del mismo contra la tracción, las curvaturas, la tensión y los esfuerzos laterales a que es sometido durante su fabricación, transporte e instalación.

A continuación se mencionarán las características mecánicas, dimensiones y propiedades de algunos cables utilizados en la actualidad. En particular se contemplará:

a) cables monofibra para instalaciones interiores

- b) cables multifibra para instalaciones en ductos
- c) cables multifibra para instalaciones aéreas o directamente enterradas
- d) cables submarinos

Los cables monofibra se usan para prolongar los cables multifibra de planta exterior, hasta los equipos de transmisión ubicados en el interior de oficinas, estaciones, etc.. Para llevar és to a cabo, el cable multifibra se empalma con tantos cables monofibra como fibras tenga el primero. Es importante que las fibras de ambos cables se hayan fabricado con la misma tecnología, y tengan especificaciones ópticas y geométricas similares para evitar empalmes defectuosos.

La Fig. 1-20 muestra una configuración típica de cable monofibra, y la Tabla 1-5 especifica algunas características mecánicas representativas. En el caso particular de la Fig. 1-20, la fibra presenta un recubrimiento secundario de tipo holgado, por encima del cual se aplica una cubierta de refuerzo a base de Kevlar 49 o fibra de vidrio con resina epóxica, por ejemplo. Finalmente, se aplica la cubierta exterior que puede ser de poliuretano, polipropileno, etc.; normalmente antifluga.

Por su parte, los cables multifibra son utilizados para instalaciones en ductos, aéreas o directamente enterradas (ver Fig. 1-21 y Fig. 1-22). La diferencia esencial de éstos cables con los tratados anteriormente, radica en una cubierta adicional separada en ocasiones por una armadura de cintas de aluminio o ace

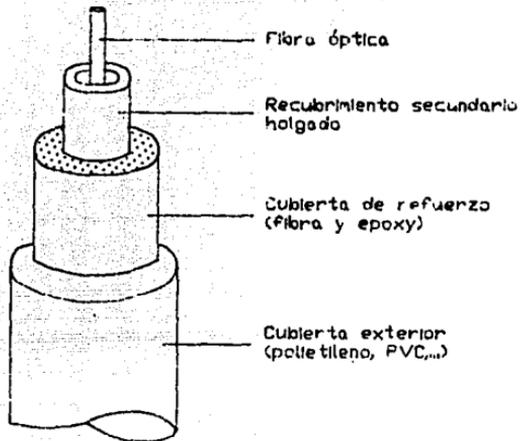


FIG. 1-20 EJEMPLO DE CABLE MONOFIBRA PARA INSTALACIONES DE PLANTA INTERIOR

PARAMETRO	CABLE OPTICO MONOFIBRA
RADIO DE CURVATURA MIN.	15 - 20 mm
DIAMETRO EXTERIOR	2 - 3 mm
PESO	8 - 15 Kg/Km
RESISTENCIA A LA PRESION	500 N/cm
TRACCION DE RUPTURA	≈ 1500 N
MAXIMA TRACCION DE TENDIDO	≈ 300 N

TABLA 1-5 CARACTERISTICAS MECANICAS DEL CABLE MONOFIBRA

ro; lo cual se hace como protección extra contra el medio ambiente exterior en el que son instalados.

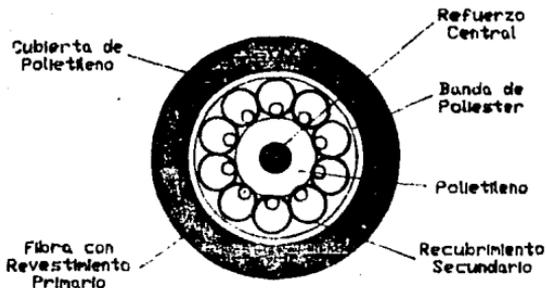


FIG. 1-21 CABLE MULTIFIBRA PARA INSTALACION EN DUCTOS

En los cables multifibra para instalaciones de planta exterior pueden usarse indistintamente fibras con recubrimiento holgado (Fig. 1-21) o ceñido (Fig. 1-22).

La Tabla 1-6 contempla algunos datos sobre los parámetros mecánicos y geométricos de los cables multifibra.

Otra alternativa a considerar, es la inclusión de elementos metálicos en la estructura del cable. Los principales argumentos para hacer cables sin elementos metálicos son los siguientes:

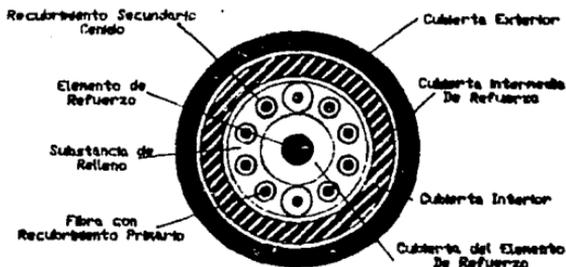


FIG. 1-22 CABLE MULTIFIBRA PARA INSTALACION DIRECTAMENTE ENTERRADA

PARAMETRO	CABLE DE SEIS FIBRAS (NO METALICO)
DIAMETRO EXTERIOR	9-14 mm
PESO	50-100 Kg/Km
RADIO CURVATURA MINIMO	100 mm
MAXIMA TRACCION DE TENDIDO	60-150 Kg
MAXIMA PRESION LATERAL	60-150 Kg/cm
MARGEN DE TEMPERATURAS	-20 a +50 °C

TABLA 1-6 CARACTERISTICAS MECANICAS DEL CABLE MULTIFIBRA

- a) menor peso
- b) no presentan la posibilidad de conducir descargas o inducciones eléctricas
- c) mayor sencillez en los empalmes

Los elementos metálicos (básicamente el elemento central de refuerzo y las eventuales cintas de aluminio o acero por debajo de la cubierta exterior) pueden reemplazarse por fibra textil o fibra de vidrio con epoxy, por ejemplo. La Tabla 1-7 muestra algunas opciones para sustituir los elementos metálicos, por elementos no metálicos.

ELEMENTO DE LA ESTRUCTURA DEL CABLE	D I S E Ñ O	
	M E T A L I C A	N O M E T A L I C A
ELEMENTO CENTRAL DE REFUERZO	ACERO	FIBRA DE VIDRIO Y EPOXY; FIBRA TEXTIL
CUBIERTA	ALPETH/STALPETH	PLASTICO; FIBRA TEXTIL
CINTAS	ACERO/ALUMINIO	CINTAS DE PLASTICO; POLIESTER, ETC.

TABLA 1-7 OPCIONES PARA SUSTITUIR ELEMENTOS DE REFUERZO METALICOS EN LOS CABLES DE FIBRA OPTICA

Los cables submarinos requieren diseños apropiados a las exigentes condiciones mecánicas a que se ven sometidos. De hecho,

la estructura del cable depende del lugar en el cual va a ser instalado: en aguas profundas o en plataforma continental. La Tabla 1-8 reúne algunas características mecánicas de este tipo de cable. La Fig. 1-23 presenta el esquema de un cable típico de aguas profundas. En ella, se identifica un núcleo óptico (en este caso con tres fibras) alrededor de un elemento central de refuerzo; el núcleo va encerrado dentro de un trenzado de hilos de acero y protegido por una cinta plástica y una cubierta de polietileno. Los hilos de acero se recubren con una cinta de acero, encima de la cual se aplica la cubierta exterior de polietileno.

PARAMETRO	CABLE PARA AGUAS PROFUNDAS	CABLE DE PLATAFORMA CONTINENTAL
RESISTENCIA A LA TRACCION	9 - 11 TM	28 TM
ELONGACION MAXIMA	$\leq 0.5 \%$	$\leq 0.65 - 0.5 \%$
RADIO DE CURVATURA	0.75 m	1.25 m
CARGA LATERAL	$\leq 15 \text{ TM/m}$	$\leq 6 \text{ TM/m}$
PROFUNDIDAD MAXIMA	7-8000 m	—

TABLA 1-8 CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS CABLES SUBMARINOS

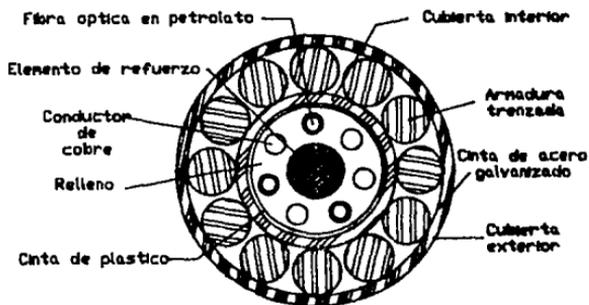


FIG. 1-23 EJEMPLO DE CABLE SUBMARINO

EMPALMES Y CONECTORES

En la realización de sistemas prácticos de transmisión por medio de fibras ópticas, se hace necesario la utilización de dispositivos de interconexión con el fin de unir diferentes secciones de fibra. Para este propósito existen dos técnicas de conexión: el empalme y el conector.

Se utiliza un empalme para unir permanentemente dos secciones de fibra, en aplicaciones donde la distancia que ha de cubrir el sistema es mayor que las longitudes de cable disponible, o cuando las longitudes de cable que pueden instalarse están sujetos

a limitaciones prácticas. También se emplean empalmes para reparar cables ya instalados.

Un conector es un dispositivo desmontable, que se utiliza cuando es necesario unir y desunir fácilmente las fibras. Esta necesidad se presenta por lo general con los equipos de emisión, recepción y de prueba.

Las pérdidas que introducen los empalmes y conectores, constituyen una parte apreciable de las pérdidas totales de transmisión, por lo que su elección constituye un factor determinante en el diseño del sistema, particularmente en enlaces largos.

Las pérdidas totales se pueden dividir en dos grupos:

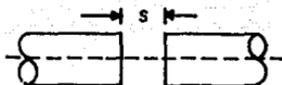
- 1) Pérdidas causadas por la fibra (intrínsecas), que se deben a:
 - diferente apertura numérica
 - diferente diámetro del núcleo
 - diferente diámetro del revestimiento
- 2) Pérdidas causadas por empalmes y conectores (extrínsecas), ocasionadas por:
 - fallas axiales
 - fallas radiales
 - fallas angulares
 - pérdidas de Fresnel
 - suciedad en la superficie de las fibras a unir o empalmar

Para disminuir las pérdidas intrínsecas, las fibras a unir o empalmar deben tener igual apertura numérica e igual diámetro

del núcleo y revestimiento.

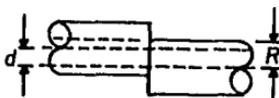
Con respecto a las pérdidas extrínsecas, se tiene:

- falla axial: la atenuación es causada por la separación entre los extremos de la fibra por una interface de aire.



s: desplazamiento axial

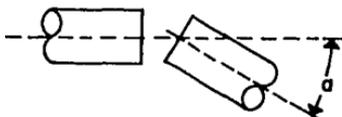
- falla radial: se da cuando el acabado de la fibra no es concéntrico y existe separación lateral entre las fibras en el punto de unión.



d: desplazamiento radial

R: radio de las fibras

- falla angular: es provocada por la diferencia angular entre las caras de las fibras en el punto de unión.



a: ángulo de desviación de los ejes de las fibras

Las otras fuentes de atenuación, son ocasionadas por rugosidades en las superficies de las fibras a unir o por la presencia de partículas extrañas en el momento del empalme. En la Fig. 1-24 se presenta una gráfica de pérdidas relacionadas a los empalmes y conectores.

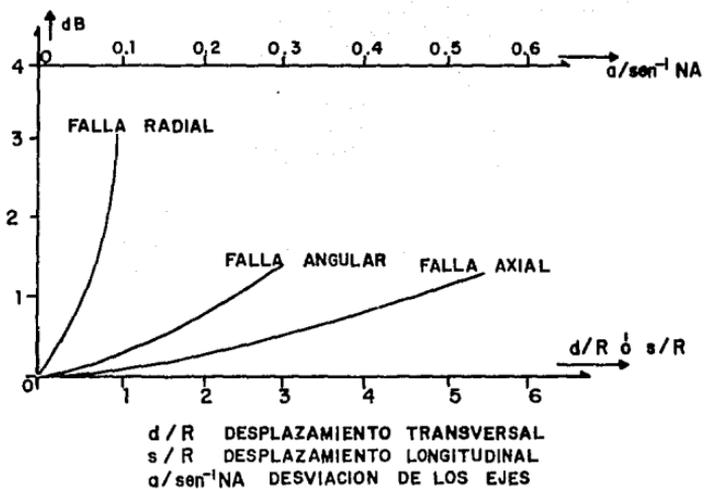


FIG. 1-24 PERDIDAS RELACIONADAS CON LOS EMPALMES Y CONECTORES

- Técnicas de empalme

Antes de que se lleve a cabo el proceso de empalme, los extremos de las fibras deben estar previamente preparados (pulidos, sin rugosidades, etc.).

Existen fundamentalmente dos técnicas de empalme que se emplean para unir fibras individuales. La primera, denominada por fusión o soldadura directa, se efectúa calentando los extremos de las fibras (los cuales se alinean y ponen en contacto previamente) hasta que se derriten y se fusionan. En la Fig. 1-25 se muestra esquemáticamente como se sueldan las fibras empleando un arco eléctrico. El proceso básico de fusión por arco comprende las siguientes operaciones: redondeado de los extremos de las fibras mediante una descarga de arco de baja energía, antes de la fusión para evitar la formación de burbujas; realización de movimientos de compresión para evitar estrechamientos en la unión fundida, durante la fusión. Posteriormente se lleva a cabo el revestimiento para proteger el empalme realizado. La media de las pérdidas en éste empalme oscila entre 0.1 y 0.2 dB.

La otra técnica es el empalme mecánico, el cual incluye un elemento de alineación de metal, vidrio o cerámica, dentro del cual quedan unidas permanentemente las fibras, y de un tubo elastomérico que rodea a las fibras puestas en contacto.

El alineamiento se lleva a cabo por medio de tres piezas moldeadas sobre un material de poliéster elastomérico. Son dos piezas centrales y un cilindro exterior. Una de las piezas centra-

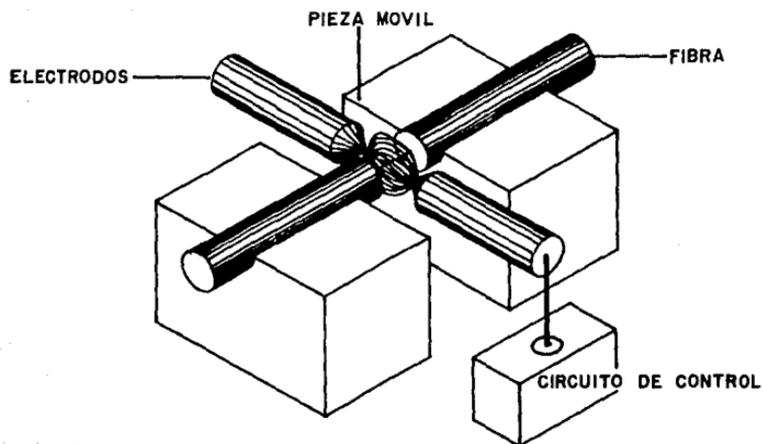


FIG. I-25 ESQUEMA DE UNA MAQUINA DE EMPALME POR FUSION CON ARCO ELECTRICO

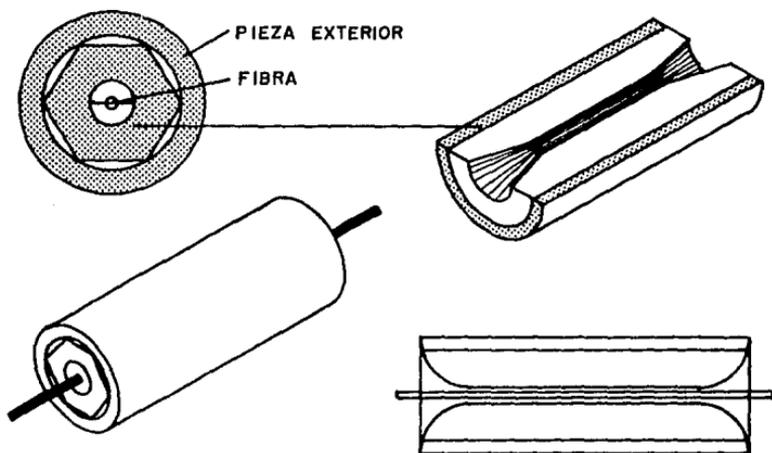


FIG. I-26 EMPAQUE ELASTOMERICO

les tiene una ranura en "V" de 60°, trazada con precisión a lo largo de la misma; al juntarse las dos piezas se forma un triángulo, en el cual se insertan las fibras a unir.

Para empalmar dos fibras, se introduce primeramente una de ellas hasta la mitad de la ranura y la otra se introduce por el extremo opuesto, hasta notar el contacto entre ellas. Las dos piezas centrales una vez acopladas, con las fibras en su interior, presentan una geometría hexagonal que se acopla dentro del cilindro externo. Para eliminar las reflexiones, se deposita epoxy o algún otro material parecido en la ranura triangular.

Las pérdidas de este tipo de empalme, son inferiores a 0.25 dB en el margen de -30 a 80 °C. La Fig. 1-26 muestra el tipo más común de empalme mecánico.

-Conectores

De manera simplificada, el conector consiste de un par de clavijas en las cuales se introduce la fibra, y de un mango que se encarga de la alineación de éstas.

Teóricamente la cantidad mínima de pérdidas en la conexión, corresponde a las ocasionadas por las reflexiones de Fresnel en la interface aire-fibra, suponiendo que no hay material entre ambos. Las pérdidas en realidad son mucho mayores al valor mínimo teórico, y son debidas en su mayor parte a los desalineamientos radial y angular existentes entre las fibras conectadas.

Los conectores pueden ser:

a) Conector multimodo

Este tipo de conector se utiliza con las dos clases de fibra multimodo: índice graduado (50 μm de núcleo y 125 μm de revestimiento) e índice escalonado (100 μm de núcleo y 140 μm de revestimiento).

Debido a sus dimensiones, la fibra de índice graduado necesita una mayor precisión en el alineamiento. Un ejemplo de los requerimientos necesarios para obtener pérdidas menores a 1 dB con éste conector, usando fibra de índice graduado, es el siguiente:

- Desalineamiento axial menor a 30 μm
- Desalineamiento radial menor a 5 μm
- Desalineamiento angular menor a 2°

Las pérdidas típicas en éste conector son:

- Pérdida promedio menor a 1.0 dB
- Pérdida máxima menor a 1.5 dB

b) Conector monomodo

Este tipo de conector se utiliza con fibras unimodo (5-10 μm de núcleo y 125 μm de revestimiento). Para tener bajas pérdidas con éste conector, es necesaria una tolerancia de aproximadamen-

te 2 μm .

La conexión con la fibra se puede hacer de dos maneras diferentes, dependiendo del tipo de conector:

- 1) la fibra es montada sin ajuste
- 2) la fibra es montada en el conector y el eje de la clavija es ajustado al eje del núcleo de la fibra.

En la actualidad, los principales fabricantes de conectores monomodo son:

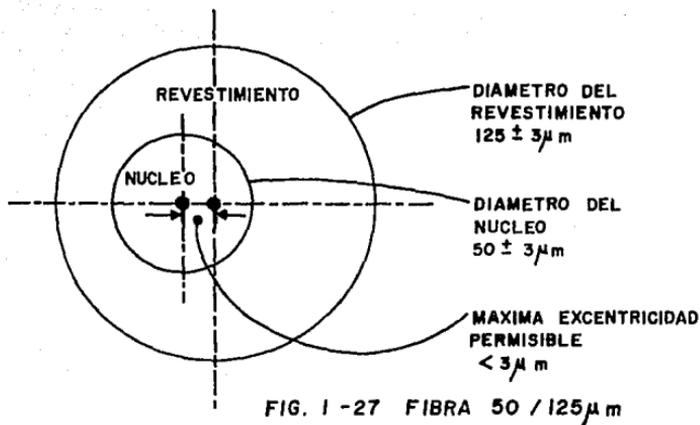
- Amphenol (Japón)
- ITT Cannon (Alemania)
- NEC (Japón)
- Seikosha (Japón)
- Hitachi (Japón)

Únicamente en conectores fabricados por Seikosha, la fibra es montada sin ajuste. Amphenol, Hitachi y Seikosha son compatibles.

Debido a que las pérdidas en la conexión es un compromiso entre las dimensiones del conector y la fibra, la tolerancia en las medidas de ésta última es muy controlada (ver Fig. 1-27).

Conectores de uso militar

Un conector con especificaciones militares debe ser hermafro-



dita, resistente a esfuerzos mecánicos y con posibilidad de mantenimiento en el campo. Otra característica de éste tipo de conectores, es su gran resistencia a ambientes hostiles.

Algunos fabricantes de conectores de uso militar son: Amphe-nol, Hughes e ITT Cannon.

Existen casi tantos conceptos de conectores como de fabricantes. El esfuerzo por su estandarización está progresando, pero todavía tomará tiempo adoptar una decisión acerca de las dimensiones más deseables en un conector estándar. Algunos tipos de

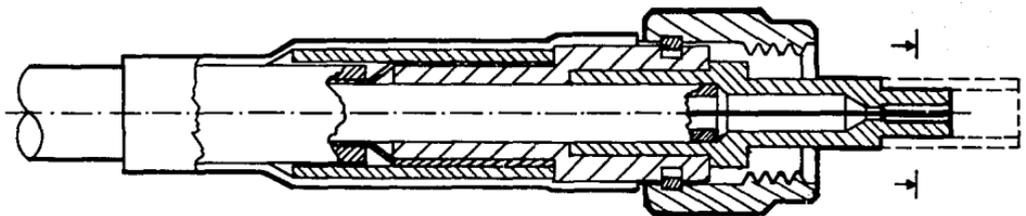
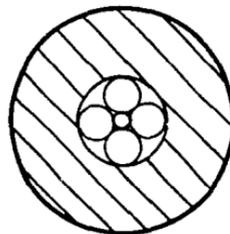


FIG. 1 - 28 CONECTOR AMPHENOL



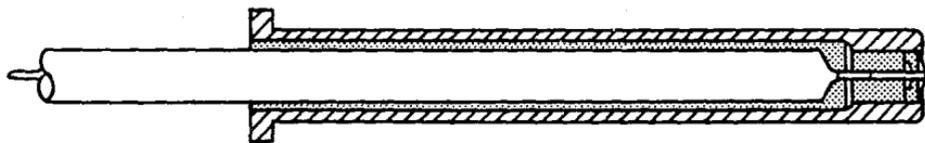


FIG. 1-29 CONECTOR CANNON

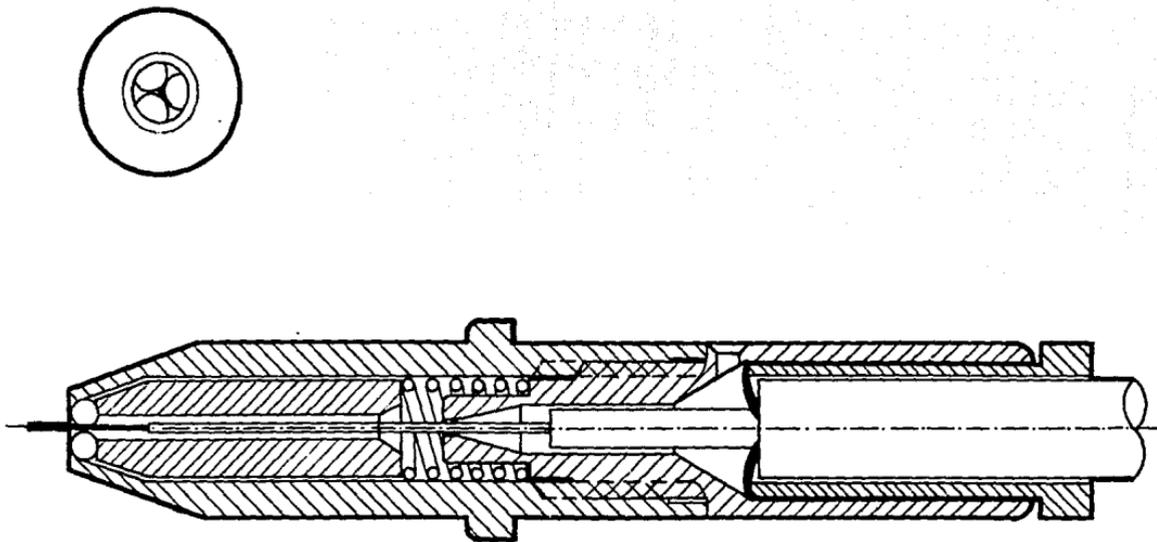


FIG. 1-30 CONECTOR STRATOS

conectores se muestran en las figuras 1-28, 1-29 y 1-30.

ACOPLADORES

Una aplicación prometedora de las fibras ópticas, es la realización de sistemas de bus de datos que sirvan de enlace entre varias terminales. La interconexión pasiva de terminales por medio de fibra óptica, requiere de dispositivos que sean capaces de acoplar cantidades controladas de la onda de luz guiada de una fibra a otra. Estos dispositivos, llamados acopladores, son elementos indispensables en las redes de terminales múltiples de sistemas ópticos de bus de datos, como los siguientes:

- Sistema T
- Sistema estrella

Ambos sistemas tienen características especiales que los hacen idóneos en determinadas aplicaciones. Las terminales del sistema T tienen acceso a la información situada en el canal principal, por medio de acopladores tipo T (Fig. 1-31). Las terminales del sistema estrella transmiten sus datos a una mezcladora central, desde la que son distribuidos a las otras terminales (Fig. 1-32). En el sistema T, es suficiente que todas las terminales sean accesibles a una sola fibra, interconectando simplemente las dos terminales del canal principal. En el sistema estrella

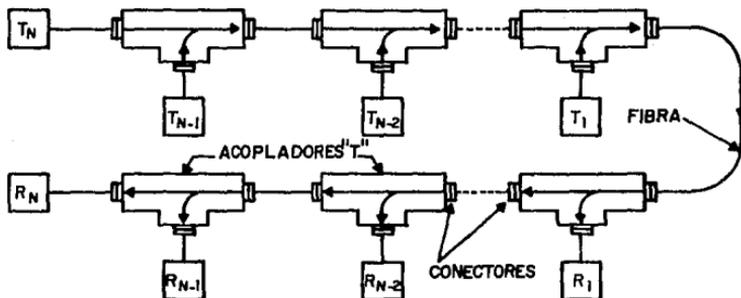


FIG. 1-31 SISTEMA "T"

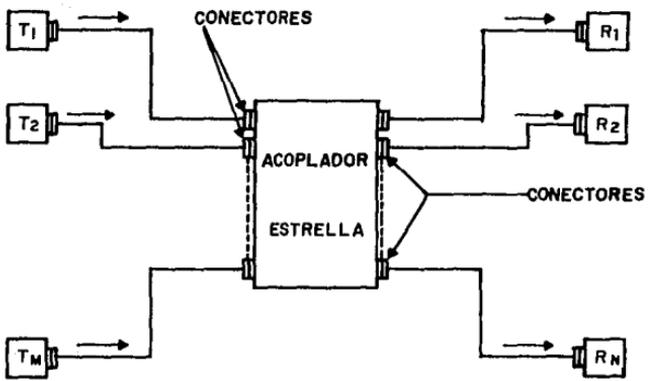
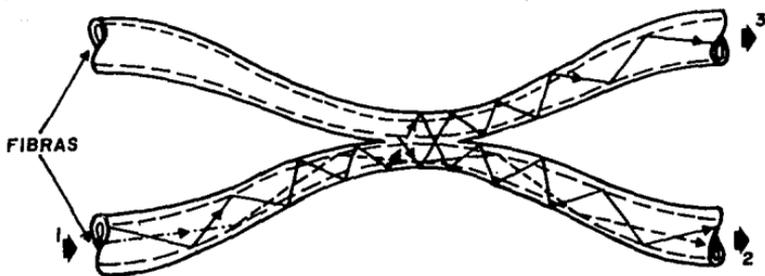
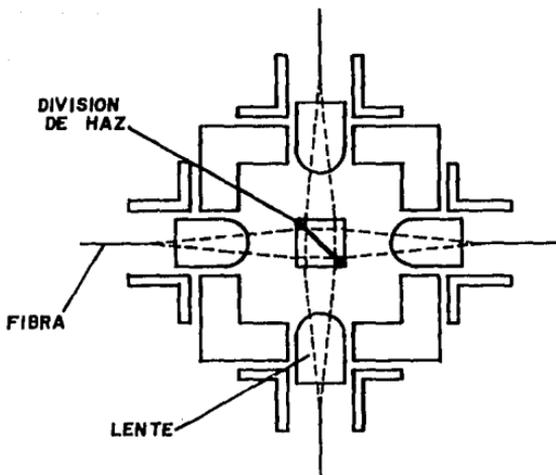


FIG. 1-32 SISTEMA ESTRELLA



a) ACOPLADOR T FUSIONADO



b) ACOPLADOR T POR DIVISION DEL HAZ

FIG. 1-33 ACOPLADORES TIPO "T"

las pérdidas se incrementan logarítmicamente con el número de terminales, mientras que en el sistema T, el incremento es lineal.

La configuración estrella tiene el inconveniente de que si la terminal está muy alejada, la longitud requerida de fibra es muy larga, debido a que cada terminal está conectada al mezclador central.

En la Fig. 1-33 se esquematizan dos acopladores tipo T, y en la Fig. 1-34 dos acopladores tipo estrella.

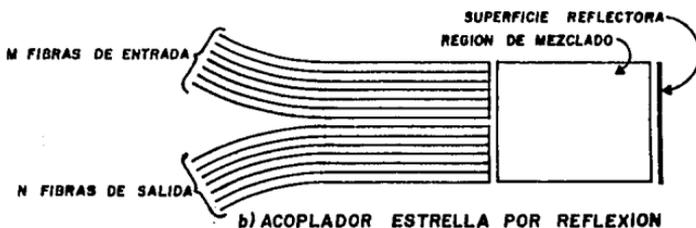
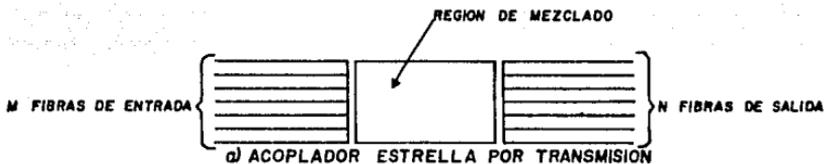


FIG. 1-34 ACOPLADORES TIPO ESTRELLA

Los sistemas de comunicación que utilizan fibra unimodo y los sensores ópticos, requieren de acopladores monomodo; los cuales, debido al pequeño núcleo de la fibra, requieren de una precisión mucho mayor en sus dimensiones que la de los acopladores multimodo.

C A P I T U L O 2

T R A N S M I S O R E S

Para la transmisión de señales eléctricas en sistemas de comunicación por fibra óptica, se hace necesario el empleo de transmisores ópticos; los cuales se constituyen de forma general, de una fuente electroluminiscente (LED o ILD) y de un circuito excitador (Fig. 2-1).

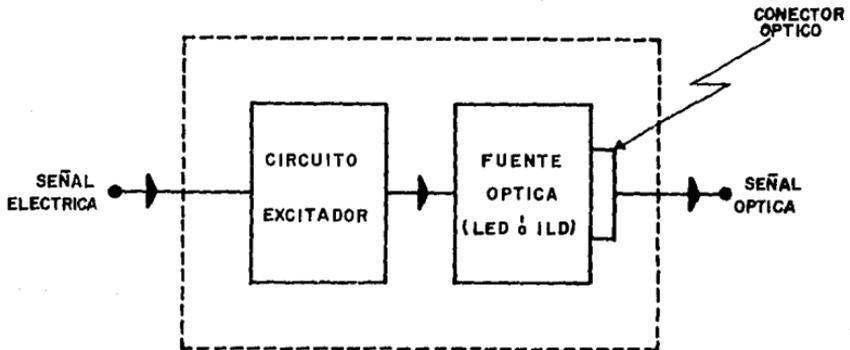


FIG. 2-1 ESQUEMA BASICO DE UN TRANSMISOR OPTICO

Como se puede observar en la figura anterior, la función realizada por el transmisor óptico es la de recibir una señal eléctrica (analógica o digital) y transformarla en una correspondiente señal óptica, así mismo el de transmitir dicha señal a través de la fibra.

A continuación se tratará con más detalle las características, tanto de las fuentes electroluminiscentes como de los circuitos excitadores utilizados en sistemas de comunicación vía fibra óptica.

FUENTES OPTICAS

El elemento principal del transmisor óptico es la fuente electroluminiscente. La función específica de dicho dispositivo es la de convertir las señales eléctricas de entrada en señales ópticas, es decir, es el transductor electro-óptico necesario al inicio de la transmisión en este tipo de sistemas.

Las fuentes electroluminiscentes que son utilizadas en este tipo de sistemas, deben satisfacer los siguientes requisitos: ser dimensionalmente compatibles con las fibras ópticas, emitir en longitudes de onda que coincidan con regiones de baja absorción, tener una alta conversión de energía eléctrica a potencia óptica, que sean fáciles de modular y tengan un costo reducido.

Los dos tipos de fuentes ópticas utilizadas principalmente en sistemas de comunicación por fibra óptica son:

- 1) Diodo Emisor de Luz (LED)
- 2) Diodo LASER de Inyección (ILD)

El utilizar uno u otro de éstos dispositivos, depende de las características requeridas en un transmisor en particular. Cada uno presenta ventajas y desventajas para una aplicación específica. Puede decirse, en general, que los diodos LED se utilizan en velocidades de transmisión bajas y enlaces cortos ($< 50 \text{ Mb/s} \cdot \text{Km}$) y los diodos LASER en velocidades de transmisión altas y enlaces largos ($> 50 \text{ Mb/s} \cdot \text{Km}$).

La fuente óptica (LED o ILD) es un diodo semiconductor fabricado principalmente por dos diferentes sistemas químicos, el de GaAs/AlGaAs cuya longitud de onda de emisión está en el rango de 0.8 a $0.9 \mu\text{m}$, y el de InP/InGaAsP que tiene una longitud de onda de emisión en el rango de 1.2 a $1.6 \mu\text{m}$. En éste último rango, se tiene tanto la atenuación como la dispersión mínimas de la fibra óptica.

En párrafos subsecuentes se discutirán los principios de funcionamiento de cada una de las fuentes ópticas mencionadas, y por último se hará una comparación entre ellas.

-Diodo Emisor de Luz (LED)

La emisión óptica en un LED, se obtiene mediante un proceso de recombinación electrón-hueco cuando una unión semiconductor

p-n se polariza directamente (Fig. 2-2). El exceso de energía se libera en forma radiativa emitiendo un fotón, o no radiativa, transformándose en calor. Los niveles de contaminación del material semiconductor utilizado, se escogen de manera que el tiempo de vida de los portadores en la unión sea pequeño. Esto asegura que la densidad de portadores, y por lo tanto la salida de luz emitida responderá rápidamente a las variaciones de la corriente inyectada. De ésta manera, la salida de luz del dispositivo puede ser modulada simplemente variando la intensidad de la corriente.

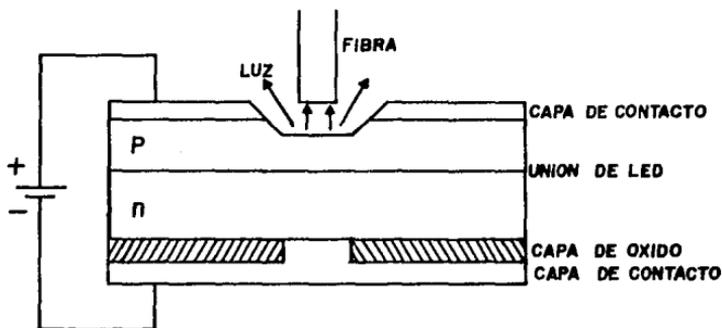


FIG. 2-2 DIODO LED DE MONOUNION

Para aplicaciones prácticas de transmisión por fibra óptica se requiere de un LED con las siguientes características: alta

radianza de salida, tiempo de respuesta de emisión corto y una gran eficiencia cuántica. La radianza se define, como la potencia electromagnética por unidad de ángulo sólido y unidad de superficie, normal a la dirección considerada. La unidad de medida está dada en Watts/(Sterad . m²). Alta radianza es necesaria para el acoplamiento de suficiente potencia óptica en una fibra. El tiempo de respuesta de emisión, es el tiempo de retardo entre la aplicación de un pulso de corriente y el principio de la emisión óptica. Este tiempo de retardo, es el factor limitante del ancho de banda con el cual la fuente puede ser modulada directamente por la variación de inyección de corriente. La eficiencia cuántica, es la razón del número de fotones emitidos al número de pares electrón-hueco inyectados.

Para conseguir una alta radianza y una gran eficiencia cuántica, la estructura del LED debe suministrar un medio de limitación a las cargas portadoras y a la emisión óptica en la región activa de la unión p-n, donde la recombinación electrón-hueco toma lugar. Esto se logra creando una área de emisión muy pequeña, confinando la corriente a una columna estrecha bajo el núcleo de la fibra por medio de una capa de óxido (Fig. 2-2). Otra forma es construyendo dispositivos semiconductores de doble heterounión. El objetivo de formar heterouniones o heteroestructuras, es confinar la luz, debido a la diferencia de índices de refracción entre las capas, y confinar también la región de tránsito de los portadores inyectados a una región muy pequeña. Esto último es debido a la diferencia de bandas de energía entre los mate

riales semiconductores. Una configuración utilizada en forma efectiva actualmente, es la mostrada en la Tabla 2-1.

FUNCION	MATERIAL	ESPESOR
CAPA METALICA DE CONTACTO		
UTILIZADA PARA MEJORAR EL CONTACTO METALICO	TIPO P GaAs	$\sim 1 \mu\text{m}$
GUIA DE LUZ Y CONFINAMIENTO DE PORTADORES	TIPO P Ga _{1-x} As _x P	$\sim 1 \mu\text{m}$ 
REGION DE RECOMBINACION	TIPO n Ga _{1-y} As _y P	$\sim 0.3 \mu\text{m}$ 
GUIA DE LUZ Y CONFINAMIENTO DE PORTADORES	TIPO n Ga _{1-x} As _x P	$\sim 1 \mu\text{m}$ 
SUBSTRATO	TIPO n GaAs	
CAPA METALICA DE CONTACTO		

TABLA 2-1 CONFIGURACION TIPICA DE UNA HETEROUNION DOBLE

El confinamiento de portadores es utilizado, como ya se mencionó anteriormente, para conseguir un alto nivel de recombinación en la región activa del dispositivo, lo cual produce una alta eficiencia cuántica. Pero también es de suma importancia para prevenir que la radiación emitida sea absorbida por el material circundante a la unión p-n. Otros parámetros que influyen en el

rendimiento del dispositivo son: absorción óptica en la región activa, recombinación de portadores en las interfaces de la heteroestructura, concentración de la contaminación en la capa activa, densidad de la inyección de portadores y espesor de la capa activa.

Los dos tipos básicos de LED's utilizados en sistemas de transmisión por fibras ópticas son: Diodo emisor de superficie (también llamado de tipo Burrus) y Diodo emisor lateral o de borde, los cuales se esquematizan en la Fig. 2-3.

El diodo emisor de superficie logra su alta radianza restringiendo la emisión a una pequeña área (15 a 100 μm de diámetro), la cual está sumergida en una gran cantidad de material semiconductor, lo que ayuda a disipar el calor de manera eficiente; además la separación de la unión semiconductor respecta a la superficie emisora se hace muy estrecha para minimizar las pérdidas por absorción. En este tipo de LED's el plano de la región activa emisora de luz es orientado perpendicularmente al eje de la fibra (Fig. 2-4). En esta configuración una cavidad es grabada directamente sobre el sustrato del dispositivo, en la cual es cementada la fibra para que reciba la emisión de luz. El área activa circular de superficies emisoras prácticas es nominalmente de unos 50 μm de diámetro y arriba de 2.5 μm de espesor. El tipo de emisión de luz en los diodos emisores de superficie es aproximadamente lambertiano, es decir, la radianza es constante en todas direcciones.

El diodo emisor lateral consiste de una región activa muy an-

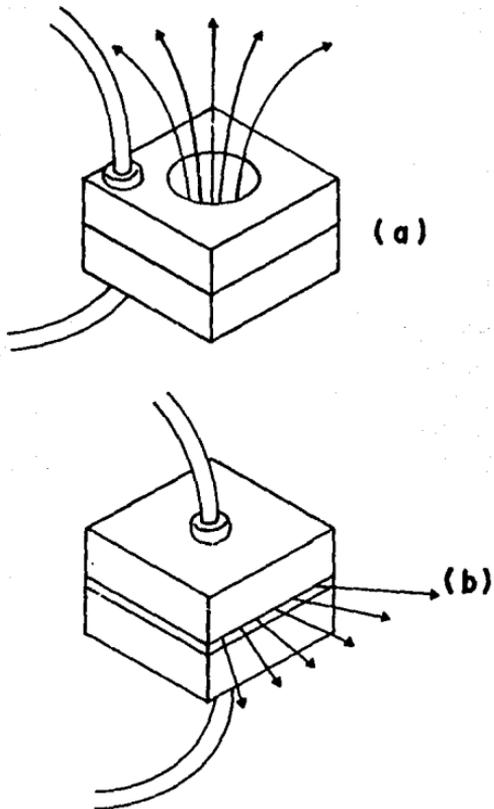


FIG. 2-3 TIPOS DE LED'S UTILIZADOS EN SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA:

a) DIODO EMISOR DE SUPERFICIE

b) DIODO EMISOR LATERAL

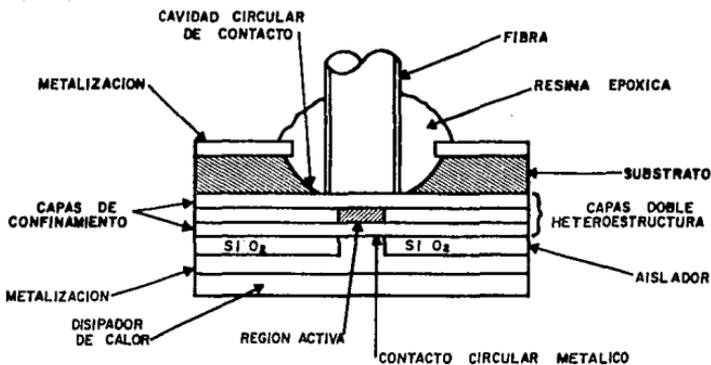


FIG. 2-4 DIODO EMISOR DE SUPERFICIE DE DOBLE HETEROUNION

gosta de aproximadamente 500 \AA y de dos capas guías. En la región activa se confinan los portadores y fotones, es decir, es la fuente de luz. Las capas guías tienen un índice de refracción menor al de la región activa, pero mayor al índice del material circundante. Esta configuración de doble heteroestructura, forma un canal guía de onda que orienta la radiación óptica hacia el núcleo de la fibra. Estos dispositivos utilizan un espejo en una cara y una cubierta antirreflejante en la otra, con el objeto de aumentar la eficiencia de emisión. La estructura del diodo emi-

sor lateral se muestra en la Fig. 2-5.

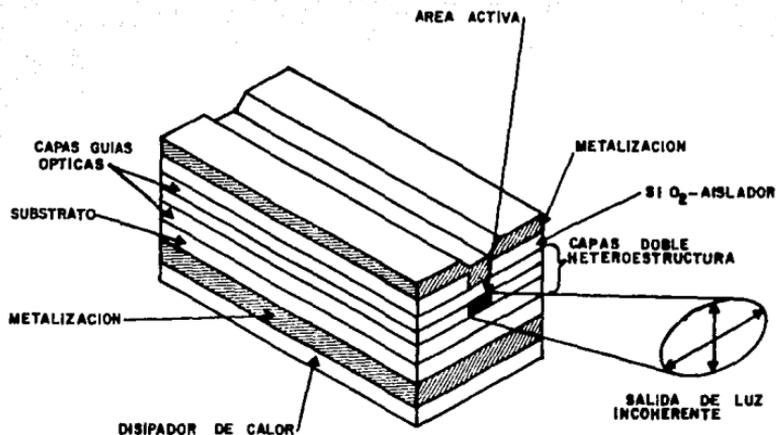


FIG.2-5 DIODO EMISOR LATERAL DE DOBLE HETEROUNION

Los diámetros típicos del núcleo de una fibra multimodo (50 a 100 μm) son compatibles con las dimensiones de la ranura de contacto del emisor lateral (50 a 70 μm de ancho). El largo de la región activa tiene un rango típico de 100 a 150 μm . La radianza de éste LED es varias veces mayor y más direccional que la del diodo emisor de superficie, pero lo complicado de su geometría hace más difícil la disipación del calor.

-Características generales de los LED's

La luz emitida por un LED, en general, puede ser considerada como un proceso aleatorio gaussiano, es decir, de tipo ruidoso: incoherente. Lo anterior produce que la luz emitida por el dispositivo, tienda a dispersarse y tenga un ancho espectral relativamente grande. El ancho espectral de la salida de un LED a temperatura ambiente en la región de 0.8 a 0.9 μm es generalmente de 350 a 500 \AA en los puntos de 3 dB (Fig. 2-6). Cabe mencionar, además, que el tipo de emisión de los LED's es aproximadamente lambertiano. Por otra parte, se puede decir que estos dispositivos tienen poca dependencia a las variaciones de temperatura, ya que el corrimiento de la longitud de onda pico con respecto a este parámetro, es del orden de 3 a 4 $\text{\AA}/^{\circ}\text{C}$.

En la gráfica de la Fig. 2-7, se muestra la relación existente entre la potencia óptica de salida con la corriente aplicada a un LED de alta radianza. En ella se observa, que la característica de la relación es bastante lineal hasta un punto de saturación, causada por el efecto de calentamiento.

El factor que limita la velocidad máxima a la que pueden ser modulados los LED's, es el tiempo de vida de recombinación de los portadores en la región de la unión; ese tiempo de vida depende del grado de contaminación de la región activa, del número de portadores inyectados, de la velocidad de recombinación y del ancho de la unión. Estos parámetros pueden optimizarse para mejorar la banda de modulación, pero a costa de reducir la eficien-

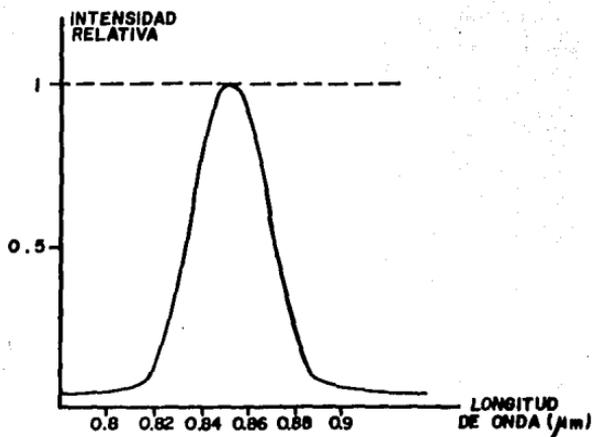


FIG. 2-6 ANCHO ESPECTRAL DE UN LED

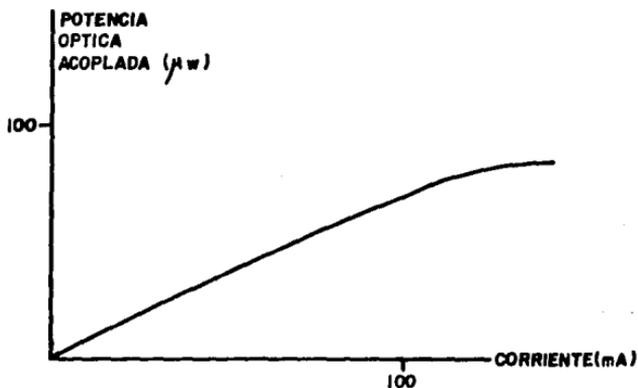


FIG. 2-7 RELACION DE LA POTENCIA OPTICA ACOPLADA EN LA FIBRA A LA CORRIENTE APLICADA A UN LED

cia cuántica. La gráfica de la Fig. 2-8, muestra el compromiso que existe entre la velocidad de respuesta y la potencia óptica en los diodos emisores de superficie de doble heteroestructura de AlGaAs. El ancho de banda de modulación se da en términos eléctricos, es decir, el ancho de banda de 3 dB de la potencia eléctrica detectada. *

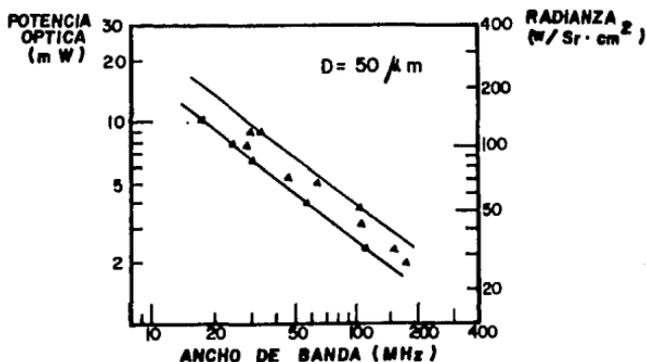


FIG. 2-8 VARIACION EXPERIMENTAL DE LA POTENCIA OPTICA Y LA RADIANZA EN FUNCION DEL ANCHO DE BANDA DE MODULACION

A modo de resumen, la Tabla 3-2 muestra las características generales de los LED's.

* El ancho de banda óptico es mejor en 3 dB que el ancho de banda eléctrico.

M A T E R I A L	GaAlAs	InGaAsP
LONGITUD DE ONDA	750-900nm	950-1630 nm
POTENCIA MEDIA	1 mW	
ANCHO ESPECTRAL	30-50 nm	70-110 nm
ANCHO DE BANDA TIPICA	10-100 MHz	
POTENCIA ACOPLADA A FIBRA	0.02-0.01 mW	
APLICACIONES CON FIBRA	MULTIMODO	
TEMPERATURA DE OPERACION	0-60 °C	
TIEMPO DE VIDA	10^8 - 10^7 HORAS	

TABLA 2-2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LED'S UTILIZADOS EN SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA

Comercialmente se pueden encontrar dispositivos con anchos de banda de 10 a 50 MHz, aunque comercialmente se tienen LED's con anchos de banda de 1.6 GHz o más.

-Diodo LASER de Inyección (ILD)

Dispositivos LASER hay de diferentes formas y dimensiones, desde los que tienen el tamaño de un grano hasta los que ocupan una habitación entera. El medio LASER puede ser un gas, un líquido, un cristal (estado sólido) o un semiconductor. Pero para los

sistemas de comunicación por fibras ópticas, son utilizados exclusivamente los diodos LASER de semiconductor.

A pesar de sus diferencias, el principio fundamental de operación es el mismo para todo tipo de LASER. El fenómeno básico para la emisión de luz LASER es la emisión estimulada, la cual se describe a continuación, junto con la absorción fotónica y la emisión espontánea, fenómenos que también tienen lugar en los materiales semiconductores. Estos tres procesos son esquematizados en la Fig. 2-9 por medio de dos niveles de energía: E_1 en estado neutro y E_2 en estado de excitación. De acuerdo a la ley de Planck, una transición entre éstos dos estados involucra la absorción o emisión de un fotón de energía:

$$h\nu_{12} = E_2 - E_1$$

Normalmente el sistema se encuentra en estado neutro. Cuando un fotón de energía $h\nu_{12}$ choca con el sistema, un electrón en estado E_1 puede absorber el fotón de energía y ser excitado a un estado E_2 (ver Fig. 2-9.a). Cuando está en un estado inestable, el electrón retorna abruptamente al estado neutro emitiendo un fotón de energía $h\nu_{12}$; esto ocurre sin ninguna estimulación externa, por lo que es llamada emisión espontánea (ver Fig. 2-9.b). Estas emisiones son isotrópicas y de fase aleatoria, de ésta manera, aparece como una salida gaussiana de banda estrecha.

El electrón puede también ser inducido a hacer una transición de corriente descendiente desde el nivel de excitación al nivel

de estado neutro, por una estimulación externa (ver Fig. 2-9.c). Si un fotón de energía $h\nu_{12}$ choca con el sistema mientras el electrón está excitado, el electrón es inmediatamente estimulado a caer al estado neutro y emitir un fotón de energía $h\nu_{12}$. Este fotón emitido está en fase con el fotón incidente, y a la emisión resultante se le conoce como emisión estimulada.

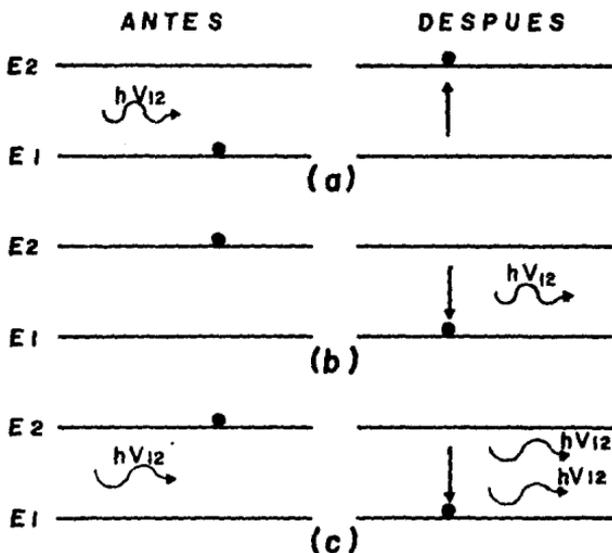


FIG. 2-9 MODELOS SIMPLIFICADOS DE LOS PROCESOS

- DE: a) ABSORCIÓN
 b) EMISIÓN ESPONTANEA
 c) EMISIÓN ESTIMULADA

La emisión estimulada es esencialmente despreciable, y solo podrá ser mayor a la absorción, aumentando la población de los estados de excitación por medio de alguna técnica de bombeo. En un LASER semiconductor, es usada la técnica de inyectar electrones en el material para excitar los estados de baja energía a la banda de conducción. La amplificación de luz se lleva a cabo, cuando un fotón incidente estimula la emisión de un segundo fotón con una energía aproximadamente igual a la separación de energía entre los dos niveles energéticos, es decir, se produce el fenómeno de emisión estimulada.

Para aumentar la densidad óptica en la región donde se produce el efecto LASER, se introduce una retroalimentación mediante dos espejos planos y paralelos, formándose de ésta manera una cavidad llamada interferómetro Fabry-Perto. Uno de los espejos se hace totalmente reflejante y el otro solo parcialmente (Fig. 2-10), y es, a través de éste último por el cual se obtiene la salida de potencia óptica, cuyas características generales son: coherencia, alta direccionalidad y alta radianza.

El diodo LASER de semiconductor, también llamado Diodo LASER de Inyección (ILD) debido a que su funcionamiento es posible gracias a la inyección de portadores en una unión semiconductor, emplea en su construcción la doble heteroestructura. Virtualmente todo diodo LASER en uso y en investigación en el presente, son dispositivos de heterounión multicapas.

En la Fig. 2-11 se ilustra el mecanismo de emisión de luz de un diodo LASER de semiconductor de doble heteroestructura. La

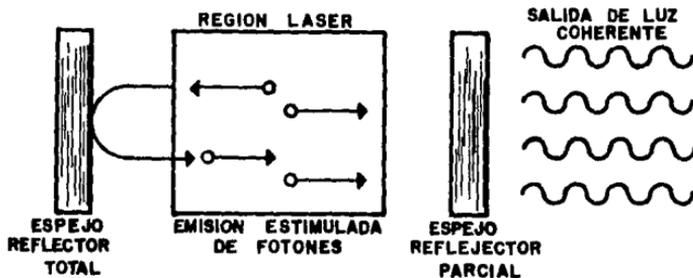


FIG. 2-10 CAVIDAD OPTICA RESONANTE

constitución del dispositivo mostrado es la siguiente:

- 1) Oblea de GaAs tipo n
- 2) Capa de $Ga_{1-x}Al_xAs$ tipo n
- 3) Capa de GaAs tipo p o n
- 4) Capa de $Ga_{1-x}Al_xAs$ tipo p
- 5) Capa de GaAs tipo p

La x se refiere a la proporción en la aleación, y su valor ésta en el rango de 0 a 0.3. Las capas 2 a 5 son constituidas sucesivamente sobre la oblea. La capa 3 es la región activa en la cual se lleva a cabo la oscilación LASER. La unión entre las capas 2 y 3 (o entre 3 y 4) es la heterounión p-n, y la unión entre las

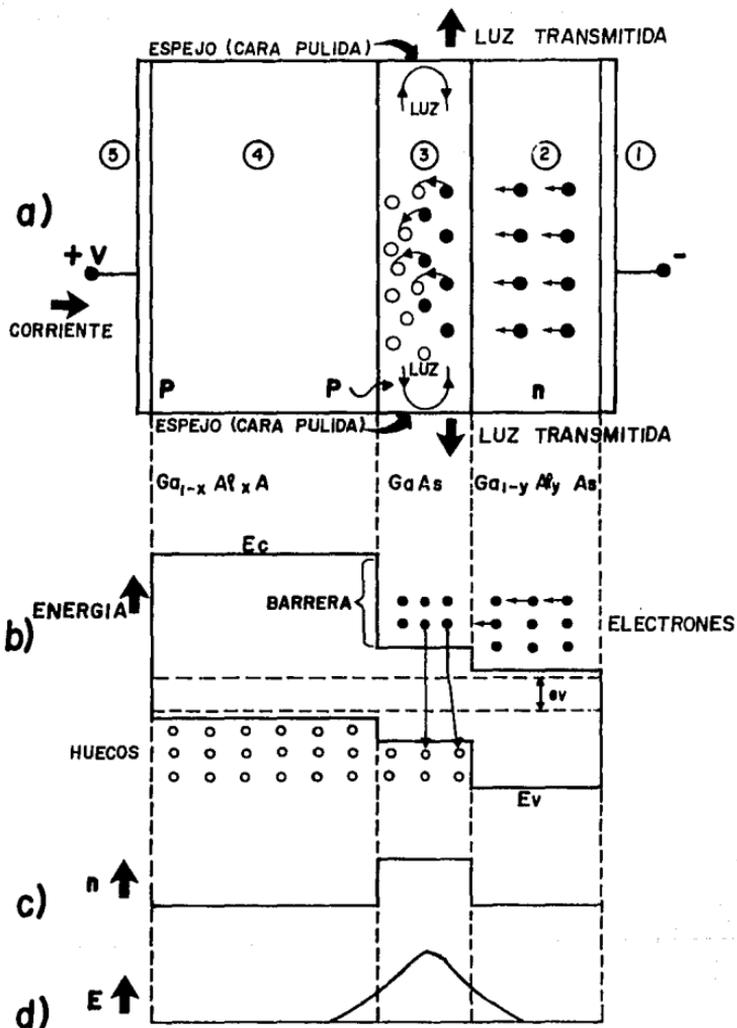


FIG. 2-11 a) ESTRUCTURA DEL LASER DE DOBLE HETEROESTRUCTURA
 b) BANDAS DE ENERGIA
 c) INDICE DE REFRACCION
 d) CAMPO ELECTRICO

capas 5 y 4 (o entre 2 y 1) es la unión aislante.

La región de recombinación está limitada por las heteroestructuras, las cuales provocan el confinamiento de los portadores y de la radiación óptica de modo que la densidad de corriente de operación requerida no sea muy alta, aumentando de ésta manera su eficiencia.

Dos configuraciones típicas de los diodos LASER de doble heteroestructura con geometría de cinta, son esquematizadas en la Fig. 2-12. En este tipo de dispositivos, la luz es amplificada en el plano de la capa activa y es guiada por la configuración geométrica de la guía de onda.

-Características generales de los ILD's

El ancho espectral de un ILD es generalmente menor a 20 \AA , lo que da como resultado una alta direccionalidad y una eficiencia cuántica muy elevada. Esta característica de los diodos LASER, los hace ideales para ser empleados en enlaces largos, ya que el problema de dispersión o ensanchamiento del pulso es mínimo (Fig. 2-13).

Así mismo, éste dispositivo tiene la característica que debajo de un cierto nivel de corriente (corriente de umbral, I_{th}) la salida óptica se comporta como la de un LED, pero arriba de dicha corriente de umbral, el ILD tiene una salida óptica que se incrementa rápidamente con una eficiencia que se aproxima al

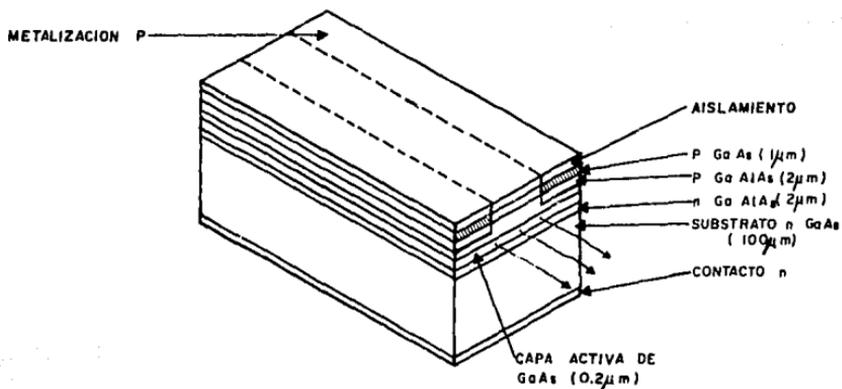
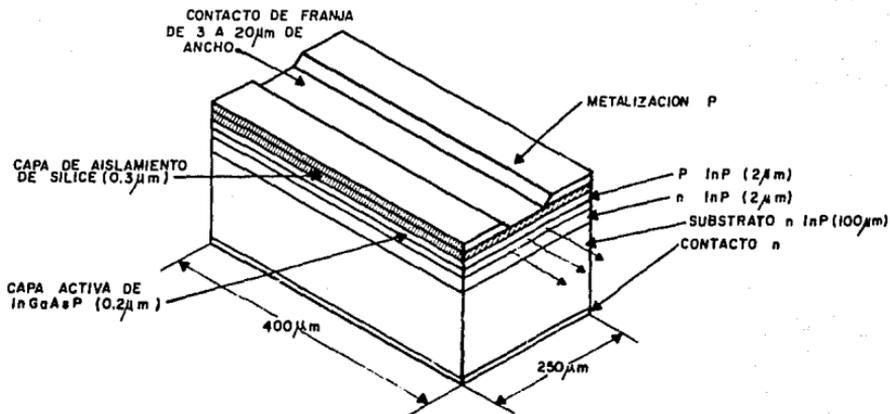


FIG.2-12 DIODOS LASER DE DOBLE HETEROESTRUCTURA CON GEOMETRIA DE CINTA

100% (Fig. 2-14).

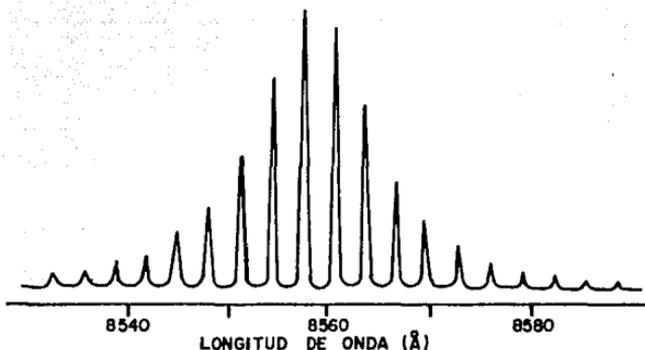


FIG. 2-13 ESPECTRO DE EMISION DE UN DIODO LASER DE GaAlAs OPERANDO EN FORMA CONTINUA A 1.15 VECES LA CORRIENTE DE UMBRAL

En la Fig. 2-15 puede observarse la relación existente entre la variación del nivel de umbral con la temperatura. Valores de 0.5 mA/°C son típicos en ésta clase de dispositivos. La característica de salida no lineal del diodo LASER y su dependencia en función de la temperatura, hacen que sea necesaria cierta forma de control por retroalimentación para obtener un funcionamiento estable del dispositivo.

En lo que respecta a modulación, se tiene que la emisión luminosa de los ILD's se ha trabajado a velocidades de hasta 2.5 Gbits/s, modulando directamente la corriente de inyección.

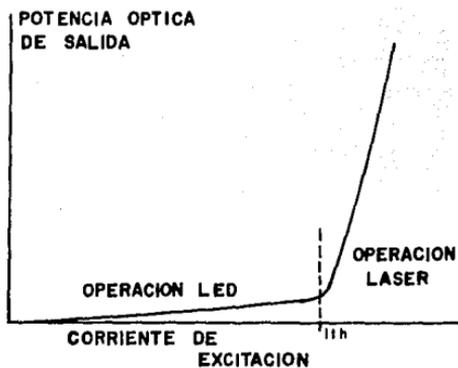


FIG. 2-14 CURVA CARACTERISTICA CORRIENTE-POTENCIA DE UN ILD

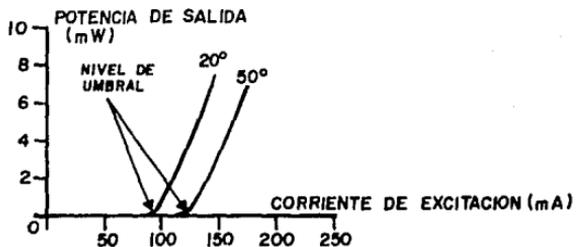


FIG. 2-15 CORRIMIENTO DE NIVEL DE UMBRAL EN FUNCION DE LA TEMPERATURA EN UN ILD

La confiabilidad del ILD ha ido en aumento en los últimos años y en la actualidad se estiman tiempos de vida útil para su funcionamiento a 20 °C de 10^5 a 10^6 horas.

Complementando la información dada anteriormente, la Tabla 2-3 presenta algunas de las principales características típicas de los diodos LASER utilizados en sistemas de comunicación.

MATERIAL	GaAlAs	INGaAsP
LONGITUD DE ONDA	750 - 900 nm	950 - 1050 nm
PRECISION EN LA ESPECIFICACION DE LA LONGITUD DE ONDA	± 20 nm	± 30 nm
POTENCIA MEDIA	5 - 20 mW	
ANCHO ESPECTRAL	0.1 - 4 nm	0.1 - 6 nm
ESTABILIDAD DE EMISION	0.25 nm / °C	0.50 nm / °C
CORRIENTE DE UMBRAL	80 - 150 mA	30 - 100 mA
ANCHO DE BANDA TIPICA	0.5 - 2 GHz	
DIVERGENCIA DE RADIACION: PLANO PARALELO A LA UNION PLANO PERPENDICULAR A LA UNION	10° 40°	
TIPO DE FIBRA	MULTIMODO	MULTIMODO Y MONOMODO
TIEMPO DE VIDA	10^5 - 10^6 HORAS	

TABLA 2-3 CARACTERISTICAS GENERALES DE ILD's UTILIZADOS EN SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA

-Comparación de las fuentes ópticas

Aunque los LED's y los ILD's tienen un gran número de similitudes, notables diferencias existen entre ellos cuando son considerados en términos de aplicación y diseño de transmisores.

La mayor diferencia que existe entre éstas fuentes ópticas, es la coherencia espacial y temporal de la luz del diodo LASER, razón por la que se obtiene en éste dispositivo un haz de luz relativamente angosto y un ancho espectral estrecho. En contraste, la mayoría de los LED's son lambertianos y tienen un ancho espectral relativamente amplio. Estos factores manejan, respectivamente, la cantidad de potencia óptica que puede ser acoplada en el interior de la fibra y la influencia de la dispersión cromática en las propiedades dispersivas de la fibra.

Una segunda diferencia está en la velocidad. Se tienen mejores tiempos de respuesta a los cambios en la corriente de manejo en los ILD's, a los conseguidos por los LED's. En tercer lugar, la luz generada por los LED's es casi proporcional a la corriente que pasa directamente por el dispositivo. Por su parte, los ILD's son dispositivos de umbral, por lo que la luz de salida es proporcional a la corriente de manejo solamente arriba de las condiciones de umbral. Así mismo, la corriente de umbral está en función de la temperatura y edad del dispositivo, por lo que éstas características son de gran importancia en el diseño de la circuitería de manejo de los ILD's. En contraste, los efectos por cambios de temperatura en la salida de los LED's no son de

	LED'S DE BAJA RADIANZA	LED'S DE ALTA RADIANZA	LASER DE INYECCION
CAIDA DE VOLTAJE (V)	1.5 A 2.5	1.5 A 2.5	1.5 A 2
CORRIENTE DE POLARIZACION DIRECTA (mA)	50 A 300	50 A 300	10 A 300
CORRIENTE DE UMBRAL (mA)	NO EXISTE	NO EXISTE	5 A 250
POTENCIA DE SALIDA (mW)	1 A 3	1 A 10	1 A 10
POTENCIA ACOPLADA (mW)	0.0001 A 0.1	0.05 A 0.5	0.5 A 5
ANCHO ESPECTRAL (λ) 0.8 μ m 1.3 μ m	350 A 500 700 A 1000	350 A 500 700 A 1000	20 A 30 30 A 50
RADIANZA (W/cm ² /Sr)	1 A 10	10 A 1000	10 ⁵
TIEMPO DE SUBIDA (nseg) (10% AL 90%)	5 A 50	2 A 20	1
RESPUESTA EN FRECUENCIA (-3 dB, MHz)	7 A 70	18 A 175	350 A 1000
NO LINEALIDAD (%)	0.03 A 1	0.03 A 1	0.3 A 30
RETROALIMENTACION DE ESTABILIZACION	NO REQUIERE	NO REQUIERE	SI REQUIERE
TIEMPO MEDIO A FALLA (HORAS)	10 ⁶ A 10 ⁹	10 ⁴ A 10 ⁷	10 ⁴ A 10 ⁶
TEMPERATURA DE OPERACION (°C)	-55 A +150	-40 A +90	-55 A +70
COMPLEJIDAD DE ELABORACION	MUY BAJA	BAJA	ALTA
COMPLEJIDAD DE EMPAQUETAMIENTO	BAJA	BAJA	ALTA
COSTO	MUY BAJO	BAJO	ALTO

TABLA 2-4 CARACTERISTICAS OPTICAS Y ELECTRICAS DE EMISORES DE LUZ LED Y LASER

gran relevancia. Generalizando se puede decir que los LED's requieren de circuitería de manejo menos compleja que la utilizada por los ILD's, y su manufactura se hace a costos más reducidos.

En la Tabla 2-4 se hace una comparación más completa de éstos dos tipos de fuentes ópticas.

CIRCUITOS EXCITADORES

Al tener seleccionado el emisor de luz adecuado para una aplicación específica, se hace necesario diseñar el circuito excitador que proporcione un adecuado funcionamiento del mismo.

En forma general, el diseño de los circuitos excitadores se basa fundamentalmente en los dos factores siguientes:

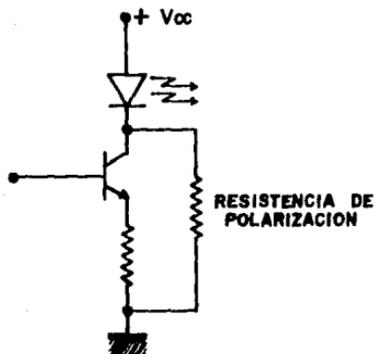
- 1) Tipo de señal a transmitir
- 2) Tipo de fuente óptica

En puntos subsecuentes se darán algunas consideraciones generales para el diseño de circuitos excitadores de los emisores de luz, utilizados en los sistemas de transmisión por fibra óptica.

-Circuitos excitadores para emisores LED

Quando se diseñan circuitos excitadores para emisores LED ope

rables en altas frecuencias, se deben considerar las variaciones de la capacitancia y la resistencia (en polarización directa) del diodo. La no linealidad resultante puede conducir a problemas en el diseño del excitador. El problema anterior puede reducirse utilizando un circuito como el de la Fig. 2-16, el cual proporciona una polarización de corriente directa para el LED, sacrificando a su vez la razón de extinción de portadores.



**FIG. 2-16 CIRCUITO EXCITADOR DEL LED
PREPOLARIZADO**

La capacidad del ancho de banda de un LED, puede ser ampliada utilizando circuitos de excitación que compensen la respuesta en altas frecuencias. Sin embargo, dichos circuitos excitadores tienden a requerir de grandes cantidades de potencia y general-

mente deben ajustarse para un LED específico. Por lo anterior, es preferible usar dispositivos LED con una capacitancia y un tiempo de recombinación lo suficientemente bajos, cuando se dispone de ellos, en lugar de técnicas complejas de igualación en el circuito manejador. Un circuito típico de excitación para dispositivos LED, sin compensación, es mostrado en la Fig. 2-17.

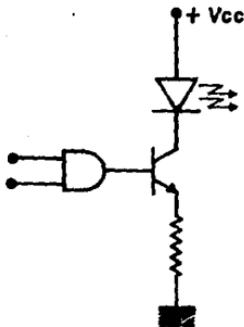


FIG. 2-17 CIRCUITO EXCITADOR LED EN UNA INTERFASE SIMPLE TTL

Otra consideración en el diseño de circuitos excitadores, es la gran cantidad de corriente que se requiere para modular los LED's, la cual puede provocar problemas asociados con la energización de subsistemas transmisores. Así mismo, la salida de la

fuente de alimentación debe ser perfectamente filtrada para evitar que el ruido afecte de algún modo, a los componentes del sistema. Una forma de reducir éste efecto, es utilizar un circuito excitador balanceado, como el que se presenta en la Fig. 2-18. Lo anterior significa que para aumentar la capacidad de velocidad de modulación y reducir el ruido en la línea de la fuente de alimentación, es necesario el sacrificio de consumo de potencia en el circuito.

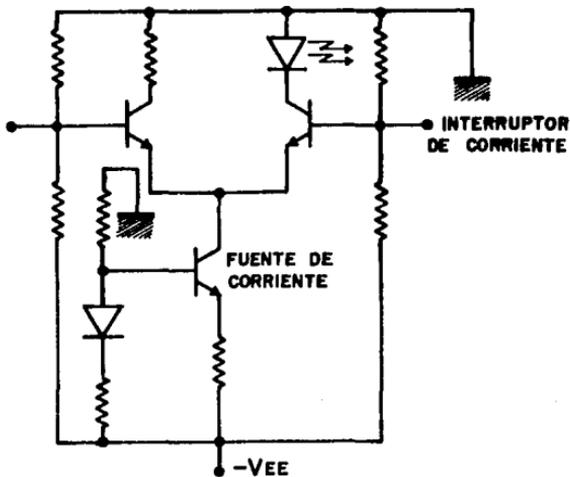


FIG. 2-18 CIRCUITO EXCITADOR ECL BALANCEADO

Por otra parte, como la característica de salida de luz del LED contra la corriente de entrada es bastante lineal hasta el punto de saturación, los circuitos excitadores digitales y analógicos para éstos dispositivos no son demasiado complejos. Sin embargo, cuando se requiere una linealidad muy alta o un espaciamiento muy preciso entre los niveles lógicos, pueden emplearse varias técnicas de retroalimentación. En la Fig. 2-19 se muestra un circuito excitador de LED controlado por retroalimentación. Como se muestra, una parte de la luz es capturada por un fotodetector local, se amplifica y se compara con la señal de excitación.

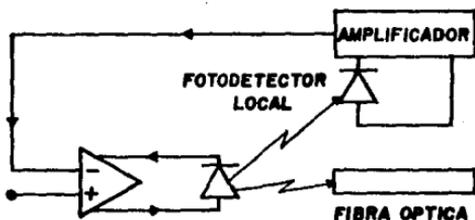


FIG. 2-19 CIRCUITO EXCITADOR DE LED CONTROLADO POR RETROALIMENTACION

-Circuitos excitadores para emisores LASER

Para utilizar el diodo LASER en transmisores ópticos, es deseable prepolarizar el dispositivo cerca de la corriente de umbral para evitar los retardos de tiempo necesarios en la generación de altas densidades de portadores, a los niveles asociados con dicha corriente.

La variación del umbral con la temperatura y el tiempo, es un problema significativo para cualquier circuito que trate de polarizar el ILD a un nivel fijo con relación al umbral. A éste respecto, se han utilizado varios métodos para estabilizar la corriente de polarización. Un método para lograr lo anterior, es monitorear la salida del diodo LASER con una derivación óptica por medio de un fotodetector local como se muestra en la Fig. 2-20. Se usa un circuito de retroalimentación para controlar la prepolarización de manera que el promedio de salida de potencia del ILD sea constante. Un problema con éste método, es que presupone que el valor medio del voltaje de la señal es constante. Si el voltaje de excitación se retira temporalmente, la corriente de prepolarización sube a un valor que puede destruir el dispositivo. Un método ideado para superar ésta deficiencia, es un circuito en el cual si la señal desaparece, el valor promedio de cero fuerza la salida del ILD también a cero.

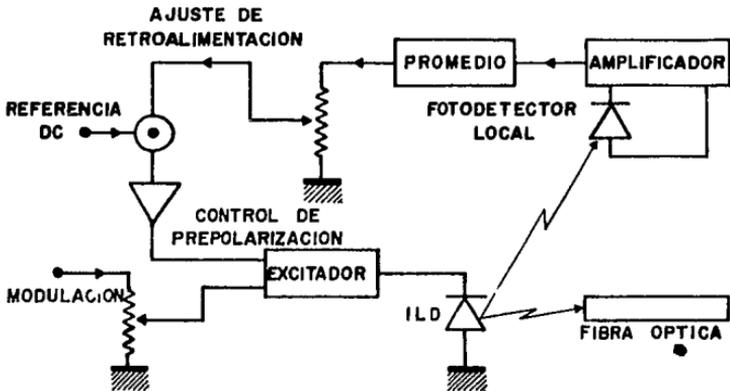


FIG. 2-20 CIRCUITO SIMPLE DE ESTABILIZACION PARA LA POLARIZACION DEL ILD

C A P I T U L O 3

R E C E P T O R E S

La recepción de la información en un sistema de comunicaciones por fibra óptica, se hace por medio de receptores ópticos; los cuales se constituyen de forma general, de un fotodetector (PIN o APD) y de un amplificador/regenerador (Fig. 3-1).

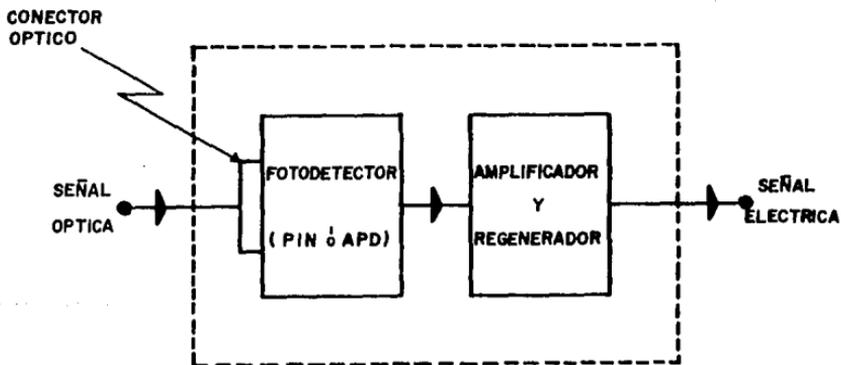


FIG. 3-1 ESQUEMA BASICO DE UN RECEPTOR OPTICO

La función del receptor óptico, es la de detectar una señal óptica, transformarla en una correspondiente señal eléctrica y amplificar y regenerar ésta última.

El receptor debe minimizar la cantidad de potencia óptica que el fotodetector necesita recibir, de modo que se tenga una razón de bits de error o una relación señal a ruido máximas, dependiendo del tipo de señal recibida: digital o analógica. Al valor de potencia mínima se le conoce como sensibilidad, y se mide en dBm de potencia óptica ($0 \text{ dBm} = 10^{-3} \text{ W}$). El valor de la sensibilidad depende del fotodetector utilizado, así como del diseño del amplificador en el receptor.

En párrafos siguientes, se discutirán con más detalle las características de funcionamiento de los principales tipos de fotodetectores utilizados en los sistemas de comunicación basados en fibras ópticas.

FOTODETECTORES

El elemento principal de un receptor óptico es el fotodetector. Dicho dispositivo, se encarga de transformar la señal óptica recibida en una señal eléctrica, es decir, es el transductor opto-eléctrico necesario para la recuperación de la información en el extremo final del enlace de transmisión.

Los fotodetectores utilizados en éste tipo de sistemas deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Tener una alta respuesta o sensibilidad en el rango de longitud de onda de emisión de la fuente óptica utilizada.
- La adición de ruido del fotodetector debe ser mínima.
- La velocidad de respuesta del fotodetector debe estar de acuerdo con el ancho de banda de la señal que se transmite.
- La salida debe ser lineal respecto a la potencia óptica de entrada.

Además es deseable que el fotodetector sea insensible a variaciones de temperatura, sus dimensiones sean compatibles con las de la fibra óptica, su vida útil sea larga, tenga un costo razonable y su corriente de oscuridad sea insignificante en comparación a la corriente producida por la señal portadora de información.

La corriente de oscuridad se define, como la emisión de electrones en ausencia de señal óptica en la entrada del fotodetector; y es responsable de la aparición de componentes aleatorios de ruido.

En la actualidad, los fotodetectores que son utilizados en los sistemas de comunicación por fibra óptica son:

- 1) Fotodiodo PIN
- 2) Fotodiodo de avalancha (APD)

En la Fig. 3-2 se muestra el circuito de polarización y el circuito equivalente de un fotodetector típico (PIN o APD).

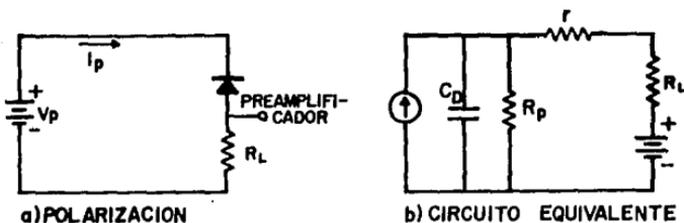


FIG. 3 - 2

-Fotodiodos

El fotodiodo más simple consiste de una unión p-n formada en un semiconductor. Al incidir luz de una determinada longitud de onda en la unión, se crean pares electrón-hueco que se desplazan en direcciones opuestas de acuerdo a su polaridad y el sentido del campo, originando una corriente (I_p) en un circuito exterior.

La fracción de luz absorbida en una región de agotamiento con ancho W , o eficiencia de absorción está dada por:

$$\eta_a = 1 - \exp(-\alpha W)$$

donde:

α = Coeficiente de absorción del material

El valor de α depende de la longitud de onda de la luz absorbida, de éste modo al evaluar η_a para el silicio a 25 °C tomando como parámetro el ancho de la región de agotamiento W , se obtiene una gráfica como la de la Fig. 3-3.

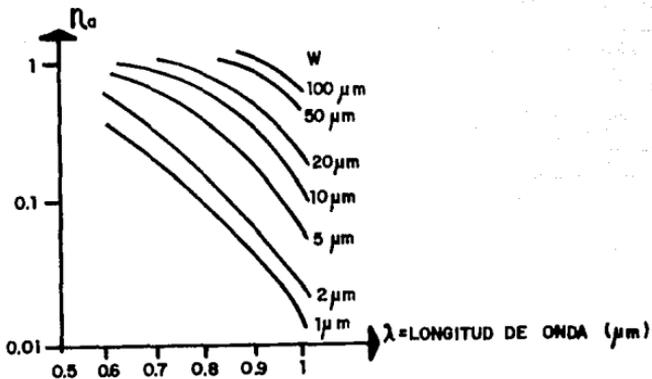


FIG. 3-3

De la gráfica se puede observar, que si se necesita una alta eficiencia de absorción para una longitud de onda de 0.8 μm , se

requiere un ancho de la región de agotamiento de 30 a 50 μm . La eficiencia cae rápidamente si la longitud de onda es mayor a 1 μm , de ahí que no se usen fotodiodos de silicio para $\lambda > 1 \mu\text{m}$.

Se define la eficiencia cuántica η_c , como la relación entre la cantidad de pares electrón-hueco generados y el número de fotones incidentes en la región de agotamiento de un fotodiodo.

Para obtener la eficiencia cuántica neta, se debe tener en cuenta la reflectividad (fracción de luz que es reflejada, denotada por r) en la entrada y la fracción de portadores absorbidos en el contacto de las regiones p y n de espesor d :

$$\eta_c = (1 - r) \{ \exp(-\alpha d) \} \{ 1 - \exp(-\alpha W) \}$$

En la práctica, los fotodiodos de silicio pueden alcanzar valores de η_c mayores a 0.9 para longitudes de onda de 0.8 a 0.9 μm .

Las características internas del fotodiodo que afectan su velocidad de respuesta son el ancho de su región de agotamiento y el valor del campo eléctrico dentro de ésta región, de modo que se obtiene una mayor velocidad de respuesta al disminuir el ancho de la región de agotamiento y aumentar el valor del campo eléctrico. Otro factor que debe reducirse para aumentar la velocidad de respuesta, es la capacitancia, que está dada por:

$$C = \epsilon_0 K \frac{A}{W}$$

donde:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \quad (\text{f/m})$$

$$K = 11.7 \text{ para el silicio}$$

El espesor de la región de agotamiento debe ser de un valor grande, para obtener una buena eficiencia cuántica y una baja capacitancia. Así mismo, para minimizar la corriente de oscuridad se necesita disminuir el volumen y área de la región de agotamiento, en contraste con la eficiencia de acoplamiento óptico, que aumenta al crecer el área expuesta a la luz.

Existen distintas formas de fabricar un fotodiodo para controlar el valor de sus parámetros críticos (tales como el ancho de la región de agotamiento), obteniéndose de ésta manera fotodiodos de diferentes constituciones, tales como el fotodiodo PIN y el APD.

Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN es uno de los fotodetectores más usados en los sistemas ópticos de comunicación; éste dispositivo consiste de tres capas: una capa p y una capa n separadas por otra intrín

seca de alta resistividad. De ahí el nombre de fotodiodo PIN, p-intrínseca-n, (ver Fig. 3-4).

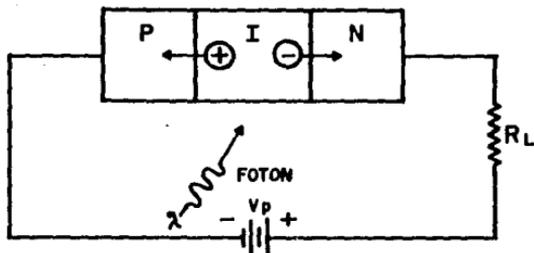


FIG. 3-4 FOTODIODO PIN

La región intrínseca se encuentra escasamente dopada, teniendo por lo tanto, pocos portadores de carga. Al estar el fotodiodo polarizado en inversa, la región de agotamiento se extiende a lo largo de la región intrínseca, de modo que el espesor de ésta región determina el de la región de agotamiento, quedando ambas del mismo tamaño.

La región intrínseca presenta una ventaja muy importante en la operación del fotodiodo: permite su manejo con bajo voltaje, manteniendo una región de agotamiento con un ancho adecuado.

En un fotodiodo normal, únicamente con regiones p y n, el tamaño de la región de agotamiento depende del dopado y de la pola

rización, de modo que dicha región aumentará si aumenta el voltaje inverso de polarización. En éstos fotodiodos son necesarios voltajes de 15 a 20 volts para mantener un espesor adecuado de la región de agotamiento, y asegurar así su linealidad. Para voltajes menores a los mencionados, el tamaño de la región de agotamiento disminuye si aumenta la intensidad del flujo luminoso que recibe, de éste modo el espesor de la región de agotamiento depende de la señal lumínica, obteniéndose como resultado distorsión. En los fotodiodos PIN ésto no sucede, ya que el espesor de la región de agotamiento se mantiene con voltajes inversos de polarización de 5 a 6 volts.

El fotodiodo PIN puede recibir luz, ya sea directamente en la región de agotamiento o a través del material p, como se muestra en la Fig. 3-5.

Para el fotodiodo PIN, la corriente I_p generada por la luz incidente con potencia óptica P está dada por:

$$I_p = \frac{q}{h \nu} \eta_c P$$

Donde η_c es la eficiencia cuántica del fotodiodo y $h\nu/q$ es la energía del fotón en electrón-volts.

La responsividad R_o de un fotodiodo, se define como la corriente producida por unidad de potencia óptica incidente; está dada por la siguiente relación:

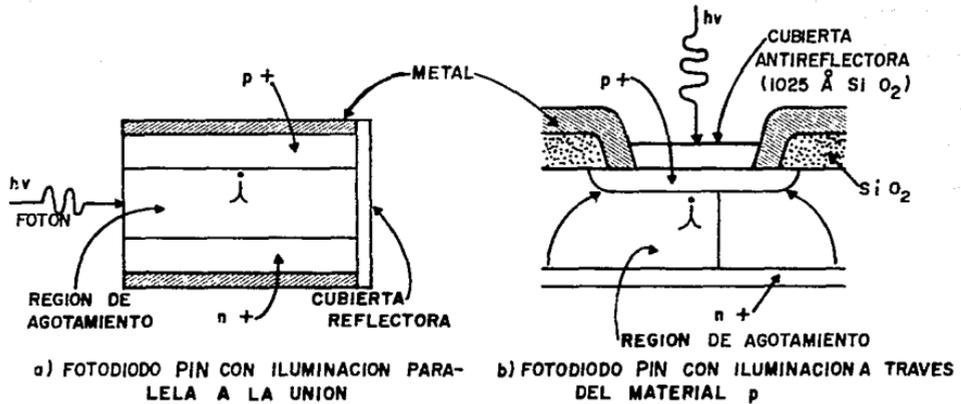


FIG. 3 - 5

$$R_o = \frac{q}{h \nu} \eta_c = 0.805 \eta_c \lambda$$

Donde λ es la longitud de onda de la luz incidente en μm . El rango de valores típicos para $\lambda = 825 \text{ nm}$ es de 0.4 a 0.6 A/W.

La gráfica de la Fig. 3-6 muestra la forma en que varía la corriente con respecto al voltaje de polarización, para un valor determinado de intensidad luminosa.

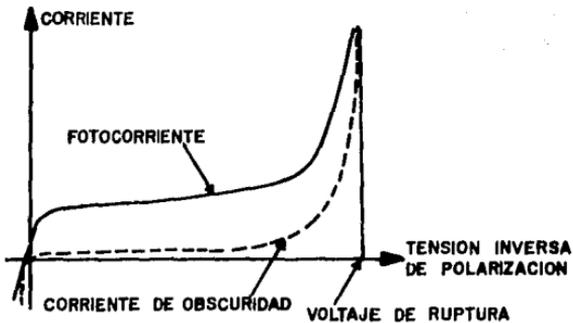


FIG. 3-6

De la gráfica anterior se puede observar que para una alta polarización en inversa, la corriente se ve incrementada por un e-

fecto multiplicativo de avalancha, lo que se traduce en una ganancia de corriente en función de la tensión aplicada.

Al trabajar con fotodiodos PIN generalmente no se llega al voltaje de ruptura, por lo que la corriente generada es casi independiente de la polarización.

Fotodiodo APD

Existe un tipo de fotodetector en el que si se trabaja con una polarización cercana al voltaje de ruptura, éstos son los fotodiodos de avalancha o APD.

Los fotodiodos de avalancha o APD contienen una región en la que se presenta un campo eléctrico alto, por lo que permiten el fenómeno de avalancha durante el cual se multiplica el número de portadores fotogenerados. Cuando un portador fotogenerado pasa por la región de campo eléctrico (del orden de 30 V/m), adquiere suficiente energía para crear nuevos portadores por impacto, formándose de ésta manera la multiplicación de avalancha.

La corriente de multiplicación (I_m) está relacionada con la corriente fotogenerada (I_p) por la siguiente ecuación:

$$I_m = M I_p$$

Donde M es la ganancia media del APD, variando en un rango de valores de 10 a 200.

Una estructura bastante utilizada para realizar la multiplicación de portadores con muy poca adición de ruido, es la que se muestra en la Fig. 3-7.

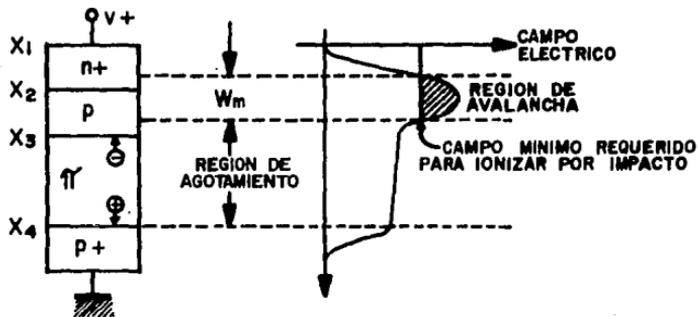


FIG. 3-7

La estructura de la figura anterior consta de un contacto n^+ entre X_1 y X_2 , una región p entre X_2 y X_3 , una región intrínseca de alta resistividad entre X_3 y X_4 (región π) y finalmente un contacto p^+ a partir de X_4 .

Cuando el diodo es polarizado en inversa, la región de agotamiento se extiende a lo largo de los contactos n^+ y p^+ , y la caída de potencial mayor se da a través de la juntura p- n^+ , por lo

que es en ésta parte donde la intensidad de campo eléctrico es mayor. Cuando se fotogenera un par electrón-hueco y el APD tiene polarización en inversa, el sentido del campo eléctrico hace que los electrones puedan pasar a la región de avalancha solo si la luz es absorbida en la región ν , de igual forma los huecos solo pasan a la región de avalancha si son generados en la región p . Se tiene una inyección simultánea de huecos y electrones si la absorción es en la región de avalancha.

En general, los APD de silicio generan menor cantidad de ruido si la inyección a la región de agotamiento es mayoritariamente de electrones; es por ésto que en la construcción del APD de silicio se favorece la absorción de luz en la región ν , con lo que se consigue que sean los electrones los portadores multiplicativos en la región de avalancha (Fig. 3-8).

En el APD la ganancia media (M) está en función del voltaje de polarización, y puede calcularse a partir de la relación siguiente:

$$M(v) = \frac{1}{1 - (v/v_{br})^n}$$

Donde v_{br} es el voltaje de ruptura en inversa y n una constante empírica. Los valores de v_{br} y n dependen de la estructura del dispositivo, material de fabricación, condiciones de iluminación

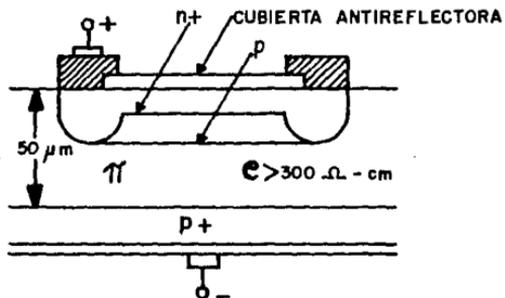


FIG. 3-8 CORTE TRANSVERSAL DE UN FOTODIODO DE AVALANCHA DE Si

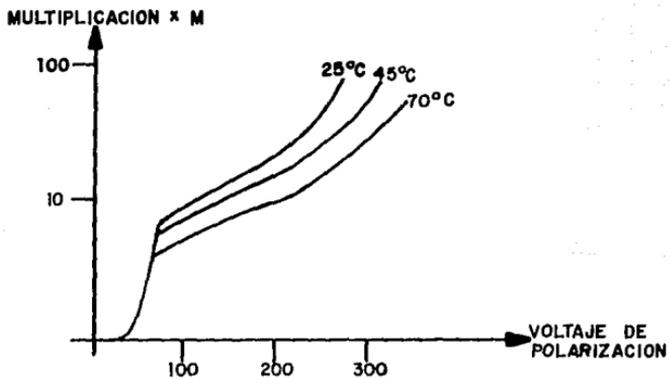


FIG. 3-9

y temperatura (ver Fig. 3-9).

Y su responsividad está dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{q}{h \nu} \eta_c M(\nu)$$

Debido a la fuerte dependencia de la ganancia media a el voltaje de polarización, el APD requiere de un circuito de compensación en la polarización, con el fin de mantener constante dicho voltaje.

La multiplicación de avalancha tiene una naturaleza aleatoria, lo que ocasiona que durante el proceso se introduzca una determinada cantidad de ruido, en general, mayor al inducido por un fotodiodo PIN. En cuanto a su velocidad de respuesta, la mayor limitante en el APD se debe a su capacitancia interna.

La linealidad respecto a la intensidad de la luz incidente, es bastante buena en un rango que va desde menos de un nanowatt hasta algunos microwatts.

A modo de resumen, la Tabla 3-1 hace una comparación general entre los fotodiodos PIN y APD.

PARAMETRO	PIN SILICIO	APD SILICIO	APD GERMANIO	UNIDADES
LONGITUD DE ONDA DETECTABLE	0.4 - 1	0.4 - 1	0.4 - 1.6	μm
PICO DE SENSIBILIDAD	0.8 - 0.9	0.6 - 0.9	1 - 1.2	μm
EFICIENCIA CUANTICA	60 - 80	40 - 80	40 - 50	%
LONGITUD DE ONDA A QUE SE MIDIO LA EFICIENCIA CUANTICA	0.82	0.82	1.15	μm
CORRIENTE DE OSCURIDAD	0.1 - 5	0.02 - 15	10 - 200	nA
TIEMPO DE SUBIDA	0.5 - 3	0.1 - 0.5	0.1 - 0.2	ns

TABLA 3-1 COMPARACION GENERAL ENTRE LOS FOTODIODOS PIN Y APD

El ancho de banda en un fotodiodo se puede calcular a partir del tiempo de subida. El tiempo de subida para un fotodiodo se define como el tiempo necesario para que la respuesta a un pulso óptico alcance, a partir del 20%, el 80% de su valor final (para un pulso eléctrico, por definición el tiempo de subida va del 10% al 90%; por lo que si se consulta la hoja de datos del dispositivo, se debe verificar si el tiempo de subida especificado es para un pulso eléctrico u óptico).

Dependiendo del dato con el que se cuente, el ancho de banda se puede determinar por las relaciones siguientes:

$$BW = \frac{0.5}{\tau_o}$$

$$BW = \frac{0.35}{\tau_e}$$

donde:

τ_o = Tiempo de subida para un pulso óptico

τ_e = Tiempo de subida para un pulso eléctrico

CIRCUITOS EXCITADORES

Al seleccionarse el receptor óptico adecuado para una aplicación determinada, es necesario diseñar el circuito excitador que proporcione un funcionamiento óptimo del fotodetector.

En forma general, dicho circuito excitador deberá diseñarse tomando en cuenta los siguientes factores:

- 1) Tipo de señal recibida
- 2) Tipo de fotodetector

A continuación se darán algunas consideraciones generales para el diseño del circuito excitador.

La Fig. 3-10 muestra el diagrama a bloques de un receptor óptico típico, que utiliza un APD como fotodetector.

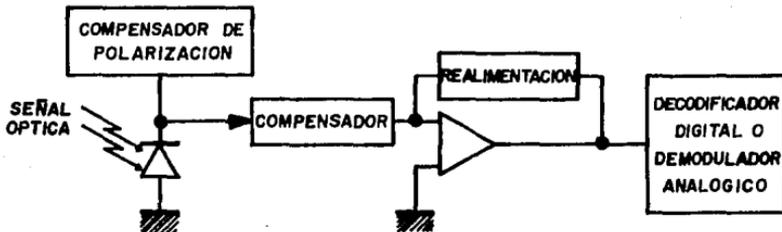


FIG. 3-10 DIAGRAMA A BLOQUES DE UN RECEPTOR CON UN APD COMO FOTODETECTOR

El compensador de polarización se requiere para polarizar el APD con un voltaje regulado. Esto es necesario, ya que se debe mantener una ganancia de corriente constante. Si en lugar del APD se usara un diodo PIN, no habría ganancia de corriente, por lo que no se requeriría un voltaje tan regulado como en el APD. El circuito para polarizar un PIN podría ser simplemente un doblador o triplicador de voltaje.

El circuito compensador puede ser un capacitor de acoplamiento, un filtro o un restaurador de DC. Su función es enlazar la

salida del APD con un amplificador; éste último debe tener una alta impedancia de entrada para evitar cargar al fotodetector y una ganancia suficiente para poder recobrar la señal. La parte final del receptor tratado, es el decodificador digital o demodulador analógico, dependiendo de la señal con que se trabaje. Si se reciben señales digitales, se hace necesaria una conversión digital/analógica, transformar el código binario a caracteres ASCII, etc., de tal manera que se pueda recuperar la información. Las señales recibidas pueden venir moduladas de diferentes maneras (FSK, PSK, AM, FM, etc.), de ahí la necesidad de la etapa demoduladora.

En la Fig. 3-11 se muestran dos circuitos básicos de las etapas de detección y amplificación.

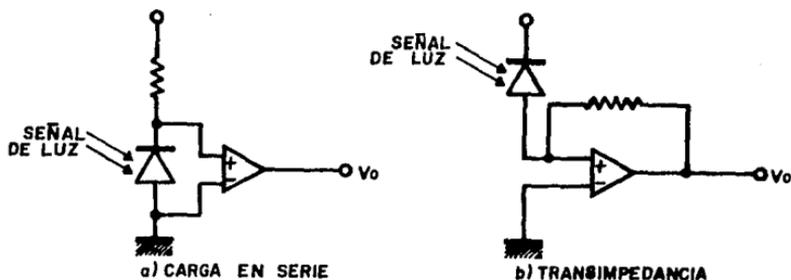


FIG. 3-11

De éstos dos circuitos, el de transimpedancia presenta un mayor ancho de banda y menor adición al ruido, por lo que es más utilizado. El amplificador en el circuito puede ser de transistores bipolares o de FET's. Para frecuencias menores a 100 MHz el amplificador de FET's tiene mejor sensibilidad, de ahí que en éste rango de frecuencias sea más requerido.

En la actualidad, existe una tendencia a introducir en un mismo integrado al fotodetector (PIN o APD) y a la etapa de preamplificación. Estos integrados dada la proximidad del detector y del preamplificador, incrementan el ancho de banda y reducen el ruido introducido al sistema, ya que se disminuye la distancia entre ellos de manera considerable. Un ejemplo de éstos dispositivos es el PIN-FET, el cual tiene un fotodiodo PIN junto con un preamplificador hecho con FET's. Estos dispositivos tienen el inconveniente de tener un costo alto, debido a que no se fabrican en gran escala.

Otro dispositivo menos costoso es el preamplificador de detector integrado o IDP (Integrated Detector Preamplifier). Este dispositivo está constituido de un detector y un preamplificador fabricados sobre una misma oblea de silicio; tiene la ventaja de proveer una salida compatible directamente con la tecnología TTL, no presenta mayor sensibilidad que el APD, sin embargo, es más estable a variaciones de temperatura y se encuentra disponible en grandes cantidades con los principales fabricantes de semiconductores.

También se pueden encontrar integrados, que además de conte-

NUMERO	FABRICANTE	T I P O	CARACTERISTICAS	VELOCIDAD DE RECEPCION (Mb/s)	POTENCIA OPTICA MINIMA DETECTABLE
MFOD240X	MOTOROLA	IDP	-	-	-
HFBR-220X,240X	H-P	IDP	-	-	-
SD3324	HONEYWELL	IDP	-	-	-
HFD3000	HONEYWELL	IDP	-	-	-
MFOC600	MOTOROLA	RECEPTOR IC	REQUIERE DATOS EN CODIGO MANCHESTER, SALIDA COMPATIBLE TTL	10	-
HFBR-200X	H-P	MODULO RECEPTOR	SALIDA PARA ENLACE A MONITOR, ACOPLAMIENTO EN AC	10	800 nW
HPL 118	LE-CROY	MODULO RECEPTOR	BAJO RUIDO, ACOPLAMIENTO EN AC	140	10 μ W
SPX4141	HONEYWELL	MODULO RECEPTOR	REQUIERE CICLO DE TRABAJO DE 50 %	10	200 nW
HFM1010	HONEYWELL	MODULO RECEPTOR	SALIDA PARA ENLACE A MONITOR, ACOPLAMIENTO AC	10	800 nW
HFM1510	HONEYWELL	MODULO RECEPTOR	EL FOTODETECTOR ES UN APD, REQUIERE FUENTE ESPECIAL DE ALIMENTACION PARA APD	10	100 nW
CODELINK-10	CADENULL	MODULO RECEPTOR	DISPONIBLE CON DETECTOR DE 1300 nm, ACOPLAMIENTO EN AC	10	2 μ W
CODELINK -100	CADENULL	MODULO RECEPTOR	IGUAL A CODELINK-10	150	63 μ W
5802	DYMEC	MODULO RECEPTOR	ACOPLAMIENTO EN DC	10	5 μ W
HRR300	OPTCONICS	MODULO RECEPTOR	OPERA A 1300nm, ACOPLAMIENTO EN AC	140	100 nW

TABLA 3-2 EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS FOTODETECTORES

ner el fotodetector y la etapa amplificadora, tengan un circuito comparador para detectar niveles lógicos y un circuito decodificador.

En la Tabla 3-2 se dan algunos ejemplos de los dispositivos anteriormente mencionados.

C A P I T U L O 4

R E P E T I D O R E S

La necesidad de considerar repetidores en un sistema de comunicaciones vía fibra óptica, depende fundamentalmente de la longitud de transmisión, la intensidad de la señal y de la atenuación en la fibra.

La constitución básica de un repetidor óptico se muestra en la Fig. 4-1. En dicha figura, se puede observar que un repetidor es básicamente un sistema receptor-transmisor, el cual realiza las siguientes funciones: recibe una señal óptica atenuada por medio de un fotodetector (PIN o APD), que hace la conversión de la señal óptica en una correspondiente señal eléctrica; a ésta última la amplifica y regenera antes de inyectarla al circuito excitador de la fuente electroluminiscente (LED o ILD), la cual hace nuevamente la conversión de señal eléctrica a señal óptica. La señal óptica de salida, es enviada por medio de la fibra al siguiente repetidor o bien a su destino final, dependiendo del número de repetidores necesarios en el sistema de transmisión.

Por ejemplo, tratemos el caso de un sistema de comunicación

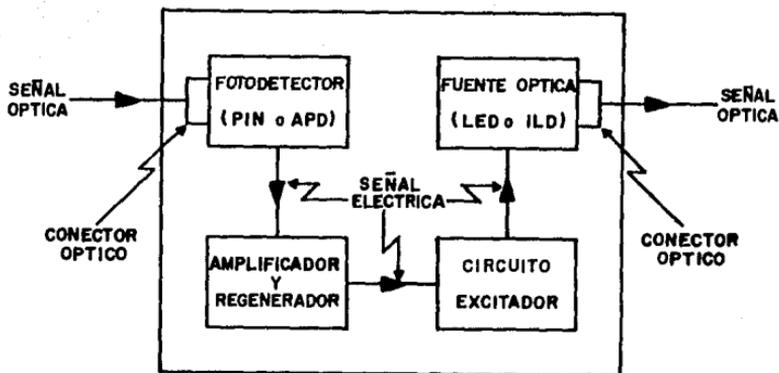


FIG. 4-1 ESQUEMA BASICO DE UN REPETIDOR OPTICO

digital en donde se haga necesario el empleo de repetidores, con el fin de que los impulsos transmitidos sean adecuadamente regenerados.

La distancia entre repetidores estará limitada por los factores de atenuación y dispersión, los que a su vez dependen de las características de transmisión del enlace y de los parámetros de las fibras ópticas. La limitación ejercida por la atenuación, tiene lugar cuando las velocidades de transmisión permiten que los pulsos de luz emitidos estén lo suficientemente espaciados, de manera que la probabilidad de error en el receptor (o la relación señal a ruido en sistemas analógicos) pueda llegar a nive-

les inaceptables antes de que la dispersión sea significativa. Por otra parte, en altas velocidades de transmisión, la dispersión produce un ensanchamiento de los pulsos ocasionando que interfieran con los pulsos vecinos, llegando al grado de identificar la información erróneamente; por ejemplo, tomar un uno como un cero o viceversa.

La dispersión llega a ser significativa cuando la distorsión por retardo del pulso transmitido, es tan grande como el intervalo entre bits. Esto se puede compensar por medio de un proceso de igualación, el cual fuerza a los pulsos a regresar a cero más rápidamente por medio de circuitos paso altos.

El fenómeno de acoplamiento entre modos reduce el problema causado por la dispersión, por lo que los resultados prácticos son mejores que los resultados obtenidos teóricamente.

Como puede observarse, la secuencia detector-amplificador--igualador ya mencionados, corresponde a un receptor óptico y es una de las partes críticas del sistema, ya que de su sensibilidad depende la separación entre repetidores. Esta sensibilidad depende a su vez del tipo de detector, del nivel de ruido del circuito receptor y del grado de interferencia entre símbolos producida por la dispersión del pulso en la fibra.

La recuperación de la señal de reloj para la detección síncrona, es posible debido a que la señal viene codificada de tal manera que presenta una gran cantidad de transiciones de nivel alto a bajo. A la salida de la etapa receptora, se ajusta un nivel de umbral con respecto al cual se decidirá si el nivel recibido

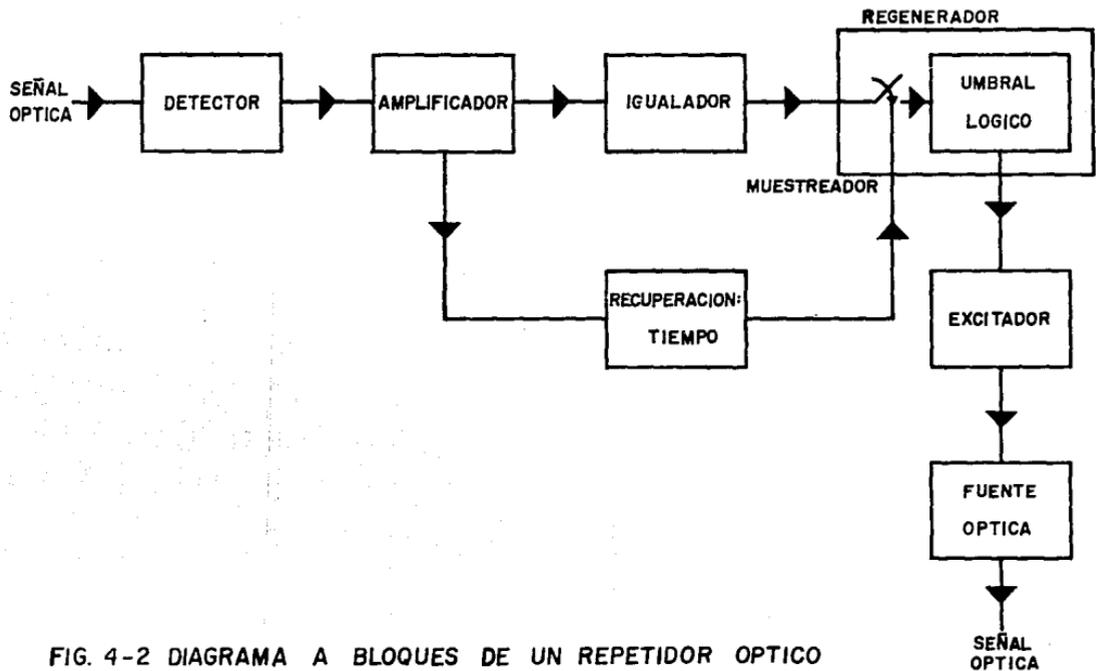


FIG. 4-2 DIAGRAMA A BLOQUES DE UN REPETIDOR OPTICO

corresponde a un uno o a un cero.

Finalmente, la última etapa en el receptor consta de una fuente emisora de luz con sus circuitos asociados de excitación y control, lo cual conforma a un transmisor óptico.

El diagrama a bloques del repetidor óptico del sistema de comunicación digital tratado, se presenta en la Fig. 4-2.

Un factor importante que se debe analizar cuando se utilizan repetidores, es la forma de darles una alimentación adecuada, es decir, generar energía de alimentación de manera eficiente y confiable. Este problema se hace más crítico cuando los repetidores están localizados en zonas aisladas y de difícil acceso, por lo que además las fuentes de poder deben requerir de un mantenimiento mínimo. Ejemplos de fuentes de energía que pueden ser utilizadas en los repetidores, son las siguientes: celdas solares, baterías recargables y generadores termoeléctricos. Cada alternativa presenta ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones prácticas presentes, por lo que generalmente se utiliza una combinación de dos o tres tipos de fuentes de alimentación.

El funcionamiento adecuado de los repetidores es necesario para lograr un enlace de comunicación eficiente y confiable, por lo tanto, un aspecto importante es la manera en que es posible vigilar y corregir los parámetros de los repetidores, con el fin de evitar una interrupción en el servicio y agilizar las maniobras de mantenimiento.

En el caso de que sea posible incluir conductores metálicos en el cable de fibra óptica, la supervisión puede realizarse a

través de éstos. Sin embargo, de no ser así, proporcionar al sistema la capacidad de telemonitoreo es un problema que debe analizarse para darle una solución satisfactoria.

C A P I T U L O 5
M O D U L A C I O N
Y
M U L T I P L E X A J E

En este capítulo, se tratarán las diferentes formas de modulación que pueden ser aplicadas en la transmisión de información en sistemas de comunicación vía fibra óptica. Así mismo, se estudiarán las principales técnicas de multiplexaje que son utilizadas en dichos sistemas.

MODULACION

La modulación es el proceso mediante el cual una señal portadora de información, conocida como mensaje, es llevada a una nueva localización espectral. El objetivo de la modulación es producir una nueva señal modulada que contenga la misma información que el mensaje, pero cuyas características para la transmisión sean más adecuadas que las de la señal original.

La modulación para un sistema de comunicación basado en fibras ópticas puede ser analógica o digital. La modulación digital en la actualidad tiene un panorama más amplio de aplicación, debido a las ventajas que presenta sobre la modulación analógica:

- Las señales digitales pueden tolerar mayor cantidad de distorsión que las señales analógicas, sin que se degrade la información transportada.
- La modulación digital es bastante compatible con fuentes ópticas como el LASER de Inyección y el LED, las cuales pueden conmutar de un nivel lógico a otro con gran rapidez.
- Se pueden combinar distintos tipos de señales (audio, video, datos, etc.) en un mismo tren de pulsos sin necesidad de técnicas especiales o pérdidas de capacidad.
- Al transmitir o recibir un pulso, solo es necesario especificar la presencia o ausencia de éste sin importar la forma del mismo.
- La mayor parte del equipo, como los cuantizadores o decodificadores, puede ser compartido por todos los canales, lo que se traduce en un menor costo por canal al aumentar el número de éstos.

Entre las desventajas de la modulación digital, se puede mencionar que se requiere de un mayor ancho de banda que en el caso analógico y necesita un proceso de codificación y otro de decodificación.

ficación en la transmisión y recepción de la información, respectivamente; sin embargo, éstas desventajas tienden a minimizarse gracias al ancho de banda disponible en las fibras ópticas y a las mejoras y abatimiento de costo en los circuitos digitales.

En la Fig. 5-1, se resumen los tipos de modulación factibles de ser empleados en los sistemas de comunicación por fibra óptica.

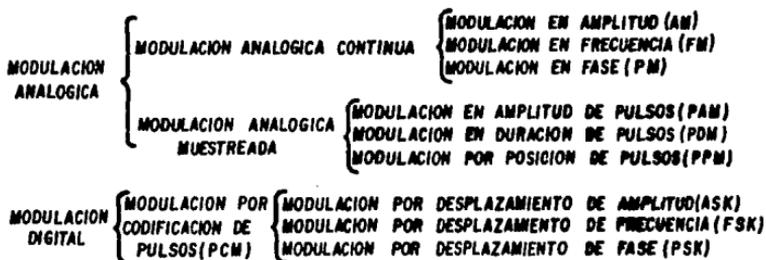


FIG. 5-1 TIPOS DE MODULACION

-Modulación Analógica Continua

La modulación analógica continua se caracteriza porque la señal portadora varía en alguno de sus parámetros de forma proporcional al mensaje a modular, de modo que el espectro de éste mensaje es trasladado a una frecuencia más elevada a fin de facilitar

tar su transmisión. Este tipo de modulación se emplea en los casos en que la señal varía en una forma continua con el tiempo. Dado que los parámetros que caracterizan a una portadora son su amplitud, frecuencia y fase, la modulación analógica continua se realiza variando alguno de ellos.

Modulación en Amplitud

En éste tipo de modulación, se varía la amplitud de una onda portadora en función del valor del mensaje o señal moduladora (Fig. 5-2). La amplitud de la onda portadora varía linealmente con los valores que toma la señal moduladora. La señal moduladora puede estar constituida por una banda de frecuencias.

La modulación en amplitud se describe por la siguiente ecuación:

$$x_c(t) = A_c (1 + mx(t)) \cos w_c t$$

donde:

$A_c \cos w_c t$: Señal portadora

$x(t)$: Mensaje

m : Índice de modulación

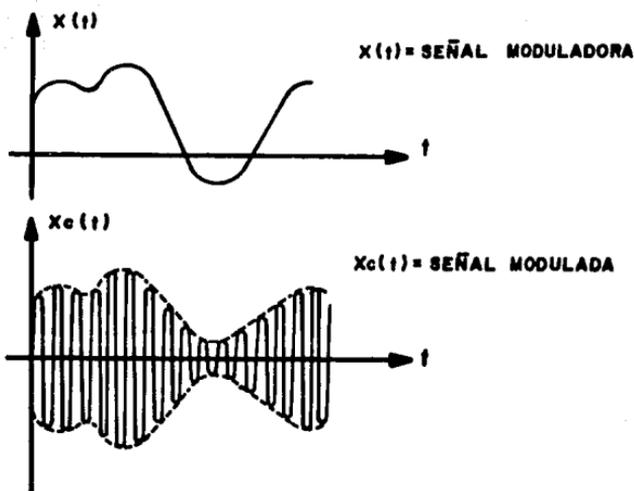


FIG. 5 - 2 MODULACION EN AMPLITUD

El espectro resultante de la señal modulada se constituye de tres componentes frecuenciales: banda lateral inferior, banda lateral superior y un impulso localizado en la frecuencia portadora. Las bandas laterales están por encima o debajo de la frecuencia portadora, en un valor igual a las frecuencias de las componentes de la señal moduladora (ver Fig. 5-3).

En la modulación en amplitud la potencia máxima en las bandas laterales es el 50% de la potencia de la portadora, y esto ocurre cuando el índice de modulación es unitario.

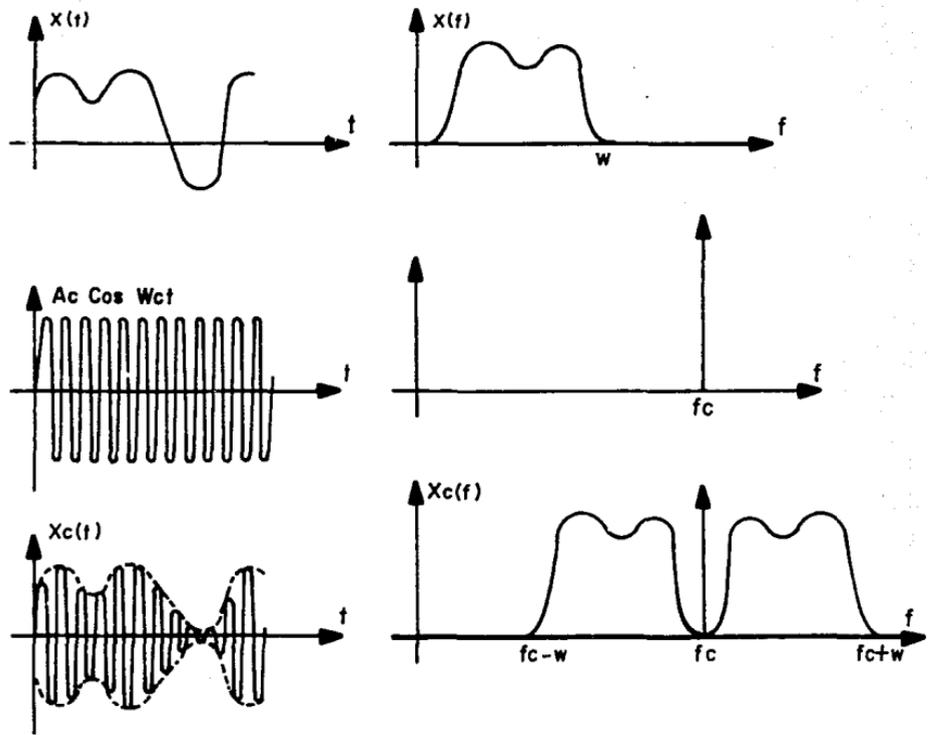


FIG. 5-3

Como se puede observar en el espectro de la señal AM, la componente de la portadora no transmite información, por lo que puede suprimirse de la señal modulada, logrando con esto un ahorro en la potencia transmitida sin que se altere la información transportada. Lo anterior da lugar a la modulación de doble banda lateral (DSB), la cual está caracterizada por la siguiente ecuación:

$$x_c(t) = A_c x(t) \cos \omega_c t$$

Para este tipo de modulación, el espectro de la señal moduladora estará formado únicamente por dos bandas componentes, que están encima y abajo de la frecuencia portadora en un valor igual a la frecuencia de las componentes del mensaje.

En la modulación DSB se tiene que la información es llevada por ambas bandas, es decir, se tiene por duplicado, por lo que eliminando una de ellas se obtiene un ahorro de energía. La supresión de la banda seleccionada se puede llevar a cabo mediante un filtro de banda lateral. A este tipo de modulación se le conoce como de banda lateral única (SSB). Tiene la ventaja de reducir el ancho de banda requerido, sin embargo, este ahorro de ancho de banda produce un aumento en la complejidad del receptor. Esta dificultad se puede anular, permitiendo que se conserve un residuo de la banda lateral indeseable en la señal modulada; és-

to también simplifica el diseño del filtro de banda lateral, ya que de éste modo no se necesita un corte muy agudo en la frecuencia de la portadora. A esta modulación se le conoce como de banda lateral residual (VSB).

Modulación Angular

En la modulación angular, la amplitud de la portadora se mantiene constante y se varía en función de la señal moduladora la fase o la derivada en el tiempo de la fase de la misma.

Si la señal portadora está dada por:

$$x_c(t) = A_c \cos (\omega_c t + \phi(t))$$

la fase instantánea de $x_c(t)$ se define como:

$$\theta(t) = \omega_c t + \phi(t)$$

y la frecuencia instantánea por:

$$\omega_i(t) = \omega_c + d\phi(t)/dt$$

Dependiendo de que varíe la fase o la frecuencia instantánea, se tendrá modulación en fase (PM) o modulación en frecuencia (FM) respectivamente.

En la modulación en fase, la variación que tiene la fase de la portadora es proporcional a la señal moduladora, es decir:

$$\theta_i(t) = \omega_c t + k_p x(t)$$

donde k_p es la constante de desviación de fase y $x(t)$ el mensaje.

En la modulación en frecuencia, la variación en la frecuencia de la portadora también es proporcional a la señal moduladora, esto es:

$$d\phi(t)/dt = k_f x(t)$$

donde k_f es la constante de desviación de frecuencia.

De ésta manera la señal modulada en fase queda determinada por la siguiente ecuación:

$$x_c(t) = A_c \cos (\omega_c t + k_f x(t))$$

y como:

$$\phi(t) = k_f \int_{t_0}^t x(\alpha) d\alpha + \phi_0$$

donde ϕ_0 es la fase en $t = t_0$, la señal modulada en frecuencia estaría dada por:

$$x_c(t) = A_c \cos (\omega_c t + k_f \int_{t_0}^t x(\alpha) d\alpha)$$

-Modulación Analógica Muestreada

A partir del teorema de muestreo se sabe que una señal limitada en banda, esto es, que no tiene componentes de frecuencia mayor a f_m (frecuencia fundamental), puede ser reproducida ente-

ramente si se toman muestras de la señal a una velocidad mayor o igual a $2f_m$. De éste modo en lugar de que la señal se envíe en forma continua, bastará con enviar un tren de pulsos de modo que la información del valor de la muestra esté contenido en alguno de los parámetros del pulso (amplitud, duración y posición). De ésta manera se puede hablar de tres tipos de modulación analógica muestreada: Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM), Modulación por Duración de Pulsos (PDM) y Modulación por Posición de Pulsos (PPM).

Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM)

La onda de la señal PAM está compuesta de pulsos unipolares, cuyas amplitudes son proporcionales a los valores muestra instantáneos del mensaje. Este tipo de modulación juega un papel importante en la multicanalización por división en tiempo, en la reconstrucción del mensaje y en el estudio de técnicas de modulación de pulsos más complejas.

Modulación por Duración de Pulsos (PDM)

En la PDM la duración de los pulsos es función directa del voltaje instantáneo de la señal. Dado que el ancho del pulso no puede ser negativo, se debe agregar a la señal moduladora una

componente de DC para que no se tengan partes negativas. El proceso de demodulación de la señal se realiza a través de un filtro paso-bajas.

Modulación por Posición de Pulsos (PPM)

Una señal PPM consiste en un tren de pulsos en el que el desplazamiento de éstos con respecto a una referencia específica en el tiempo, es proporcional a los valores muestra tomados de la señal portadora del mensaje. Al igual que en la modulación por duración de pulsos, es necesario añadir a la señal moduladora una componente de DC con el fin de evitar componentes negativas.

Como se mencionó anteriormente, en un sistema óptico de comunicación, la modulación digital presenta grandes ventajas sobre la modulación analógica. Quizá el factor más importante en el caso de que se seleccionara modulación analógica, sería el económico, ya que se evitarían los gastos relacionados con el equipo de conversión analógico-digital y digital-analógico. Las aplicaciones potenciales para la transmisión analógica utilizando fibra óptica, van desde canales de voz de 4 KHz hasta varios canales de video de 5 MHz en una sola fibra (utilizando multiplexaje por división de frecuencia).

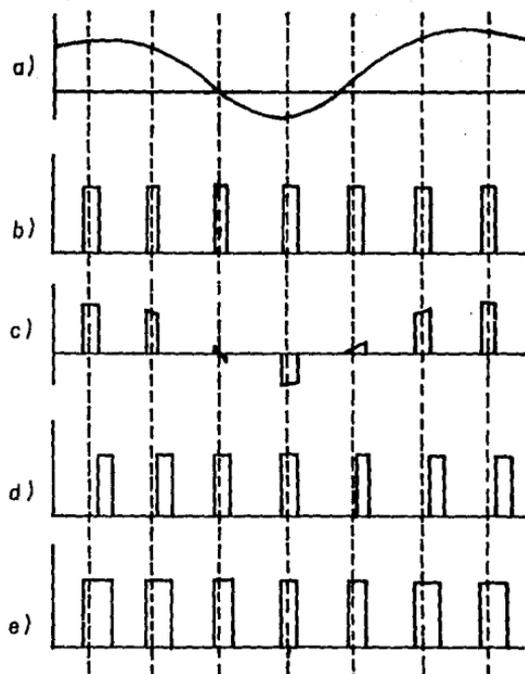


FIG. 5-4 MODULACION DE PULSOS
a) SEÑAL MODULADORA
b) TREN DE PULSOS
c) SEÑAL PAM
d) SEÑAL PPM
e) SEÑAL PDM

La modulación analógica debe tener valores altos de relación señal a ruido, así como niveles elevados de linealidad con el fin de prevenir los efectos de diafonía.

En los sistemas de comunicación por fibra óptica, las técnicas de modulación analógica más utilizadas son: PAM, PDM y PPM; ya que reducen la influencia de no linealidades en la transmisión de información.

La Fig. 5-4 muestra las formas de las señales de los tres últimos tipos de modulación mencionados.

-Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

En la modulación analógica el parámetro a variar puede tomar un valor cualquiera en el intervalo del mensaje, por lo que cuando la señal es contaminada con ruido, es muy difícil saber el valor exacto transmitido; por el contrario, si se tienen pocos valores discretos para el parámetro modulado y la separación entre éstos es grande en comparación con las perturbaciones de ruido, será más sencillo para el receptor determinar los valores que se enviaron.

Para que una señal analógica pueda ser representada en forma digital, debe ser primeramente limitada en banda (lo cual se logra por medio de un filtrado de la señal) y posteriormente muestreada y cuantificada. Una vez que la señal ha sido muestreada y cuantificada, se convierte en palabra de código digital, con lo

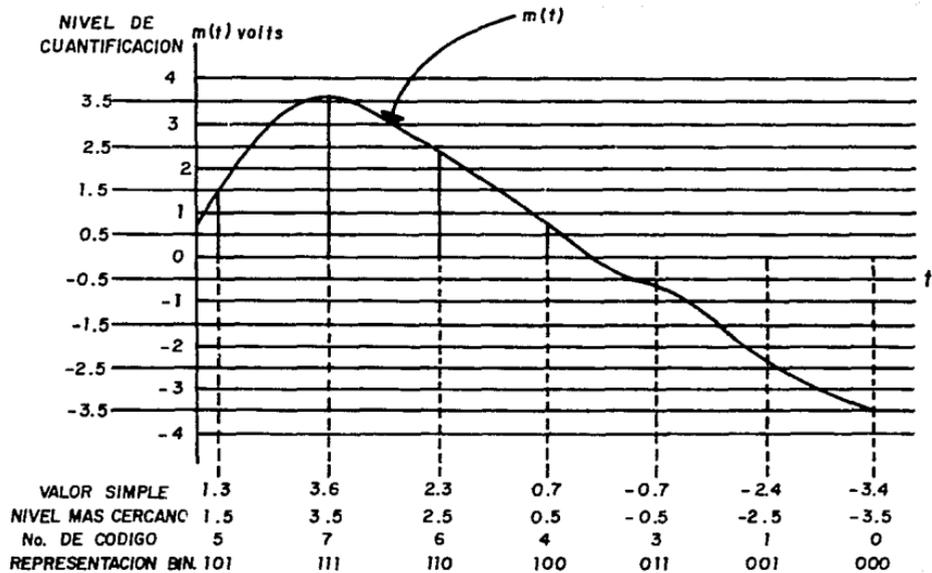


FIG. 5-5

cual se ha creado una señal de banda base por pulsos codificados en una forma de onda digital. La Fig. 5-5 muestra el proceso de cuantificación así como el de conversión a palabra digital, de una onda analógica dada.

Para propósitos de transmisión, la portadora puede ser tratada por corrimiento de amplitud (ASK), corrimiento de fase (PSK) o por corrimiento de frecuencia (FSK).

Además de la modulación por codificación de pulsos, existen otras dos técnicas para codificar señales analógicas en la transmisión digital: Modulación Delta y Modulación por Codificación de Pulsos Diferencial (DPCM).

-Modulación Delta

La modulación delta se relaciona directamente con la modulación por codificación de pulsos y tiene la ventaja de que sus componentes físicos están muy simplificados, lo que hace más simple la conversión analógica-digital. En contraste con esta ventaja, la modulación delta requiere de un ancho de banda mayor que la PCM.

Lo que hace fácil entender a la modulación delta es que solo existen dos intervalos de cuantificación, de tal forma que se tienen palabras de código de un solo dígito (0 y 1). Ver Fig.

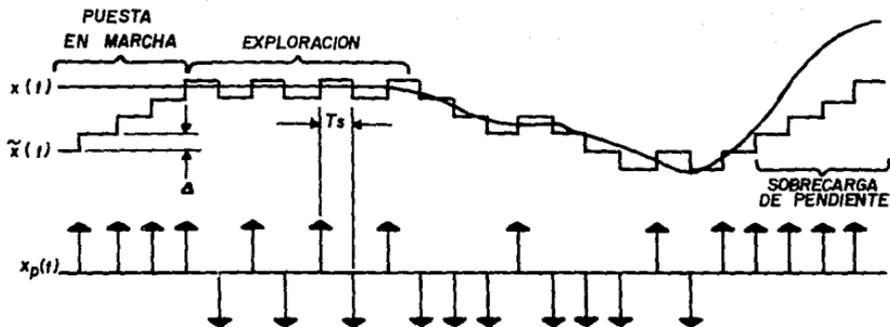


FIG. 5-6 FORMAS DE ONDA DE LA MODULACION EN DELTA

5-6.

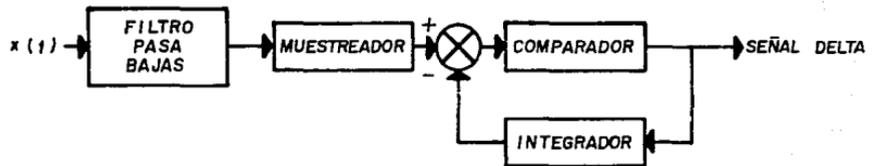
En la Fig. 5-7 se esquematizan a bloques el modulador y demodulador de un sistema con modulación delta.

La modulación delta es ideal para la transmisión de señales de voz, ya que como las frecuencias son bajas (800 Hz), se logran reducciones significativas en el ancho de banda debido a que la frecuencia de muestreo también se reduce.

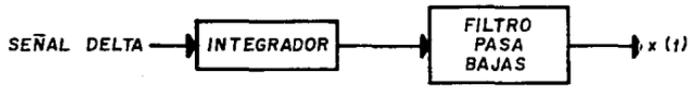
-Modulación por Codificación de Pulsos Diferencial (DPCM)

Para explicar de manera breve y sencilla a la DPCM, se compara con la modulación delta. De acuerdo con el diagrama a bloques que nos muestra como se genera la modulación delta (Fig. 5-7.a), solo haría falta cambiar el comparador por una etapa de cuantificación/codificación y agregar otra etapa de decodificación antes de la integración, para obtener la DPCM. El proceso de demodulación se hace de igual manera (Fig. 5-7.b).

La ventaja que tiene la DPCM sobre la PCM, es que una señal cuya forma no cambia drásticamente, puede ser representada con un mínimo de niveles cuánticos. Por ejemplo, la DPCM con una $Q=8$ (donde Q es el número de niveles cuánticos) genera una reproducción aceptable de una señal de video, mientras que utilizando PCM se requeriría una $Q=2^8$ para obtener una calidad de imagen comparable. De ésta manera, el ancho de banda de transmisión se reduce en $3/8$. Por lo anterior, la DPCM es la técnica de modula-



a)



b)

FIG. 5-7 MODULACION DELTA, a) MODULADOR; b) DEMODULADOR

ción más empleada en la transmisión de señales de video monocromáticas (blanco y negro).

MULTIPLEXAJE

Cuando se tiene un gran número de fuentes de datos y un solo canal de transmisión, el cual cuenta con un ancho de banda mayor que el necesario para transportar la información enviada, es conveniente contar con un método que permita transmitir todas las señales utilizando tan solo el canal disponible; a ésta técnica se le conoce con el nombre de multiplexaje.

En el caso de la fibra óptica, la técnica de multiplexaje es una herramienta muy valiosa, ya que permite hacer uso del enorme ancho de banda disponible por ésta.

Existen distintas formas de realizar el multiplexaje, cada una de ellas tiene sus propias ventajas y desventajas. A continuación se discutirán las técnicas de multiplexaje factibles de ser implementadas en un sistema de comunicación óptico.

-Multiplexaje por División en el Espacio (SDM)

En éste tipo de multiplexaje se tienen varios canales de transmisión, separados físicamente, empaquetados en un cable común. En otras palabras, cada fuente de información se relaciona

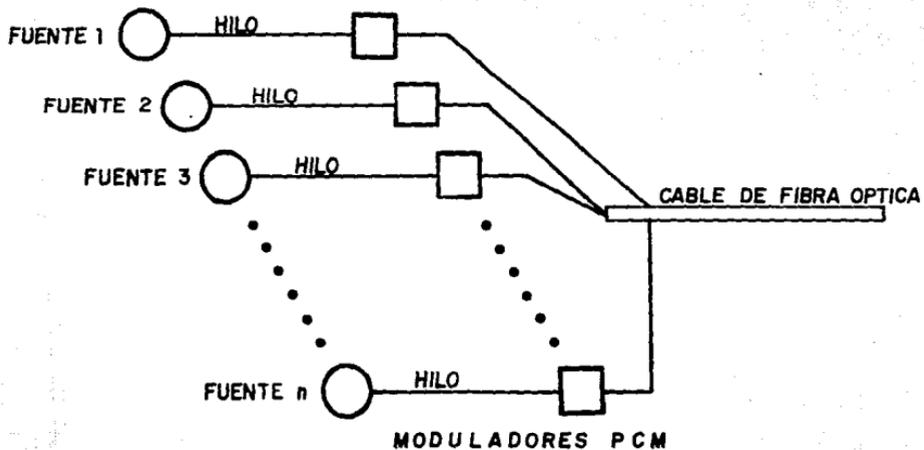


FIG. 5-8 SISTEMA SDM

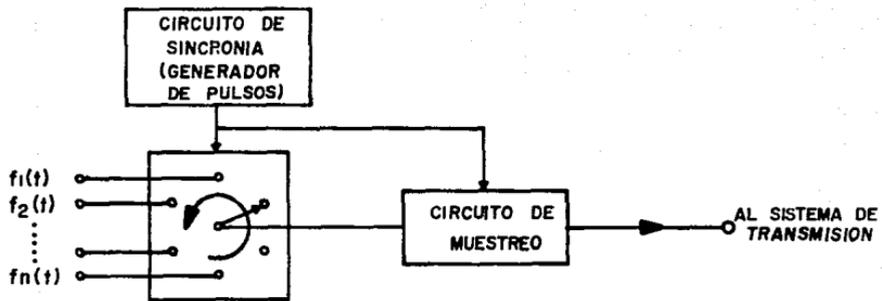
con un hilo de fibra óptica en particular (Fig. 5-8).

-Multiplexaje por División en el Tiempo (TDM)

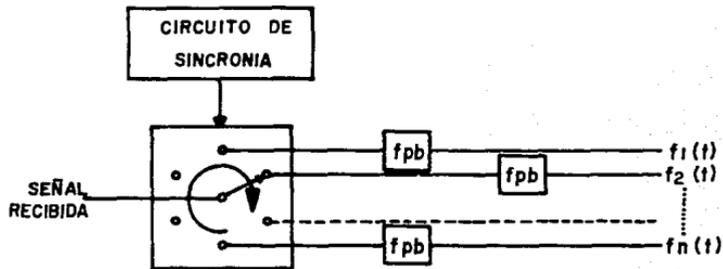
De acuerdo al teorema de muestreo de Nyquist, es posible enviar en forma completa una señal limitada en banda por medio de muestras de la misma, si dichas muestras se toman con intervalos menores a la mitad del período de la componente de la señal con mayor frecuencia. La transmisión de éstas muestras solo ocupa el canal durante una fracción de tiempo, por lo que es posible transmitir otras señales utilizando diferentes fracciones de tiempo. El proceso que se realiza es el siguiente: se toman muestras de las señales de cada una de las fuentes de información y se transmiten como un tren de pulsos.

Para poder utilizar ésta técnica es necesario el empleo de un conmutador, el cual se conecta con cada uno de los canales manejados (Fig. 5-9).

Cabe hacer notar que en el TDM las muestras de cada señal permanecen independientes, de tal modo que en el dominio del tiempo cada señal puede identificarse y ser separada de las otras, sin embargo, en el dominio de la frecuencia los espectros de las señales se mezclan y ocupan la misma región.



a) TRANSMISOR



b) RECEPTOR

FIG. 5-9 SISTEMA TDM

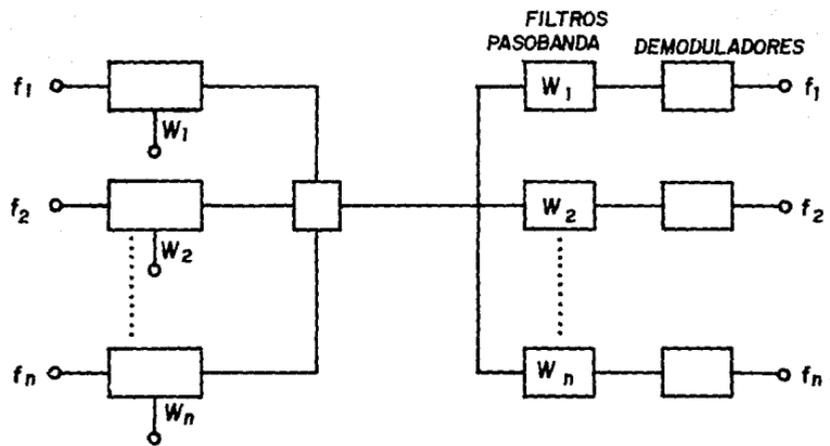


FIG. 5 - 10 SISTEMA FDM

-Multiplexaje por División en la Frecuencia (FDM)

En éste tipo de multiplexaje una banda de frecuencias es divi
dida en varias bandas más angostas, asignandole a cada una de e-
llas una señal en particular.

En el multiplexaje por división en la frecuencia, todas las
señales que se desean transmitir se mezclan en el dominio del
tiempo, sin embargo, los espectros de las señales multiplexadas
ocupan diferentes bandas de frecuencia, por lo que se pueden se-
parar por medio de filtros pasabandas adecuados (Fig. 5-10).

-Multiplexaje por División en la Longitud de Onda (WDM)

El multiplexaje por división en la longitud de onda, es proba
blemente la técnica más adecuada para ser utilizada en los sistema
s de comunicación ópticos. En ésta técnica todas las señales
se transmiten al mismo tiempo, y cada canal hace uso completo
del ancho de banda del medio de transmisión. El proceso que se
lleva a cabo es el siguiente: a cada señal se le asigna una lon-
gitud de onda correspondiente a un haz de luz, el cual es modula
do de acuerdo a la información contenida en la señal, finalmente
son enviados todos los rayos de luz a través de la fibra óptica.

En la Fig. 5-11 se esquematiza el funcionamiento de un multi-
plexor WDM (MUX-WDM), en un sistema con un solo sentido de trans
misión. Una vez que la señal ha sido modulada, los transmisores

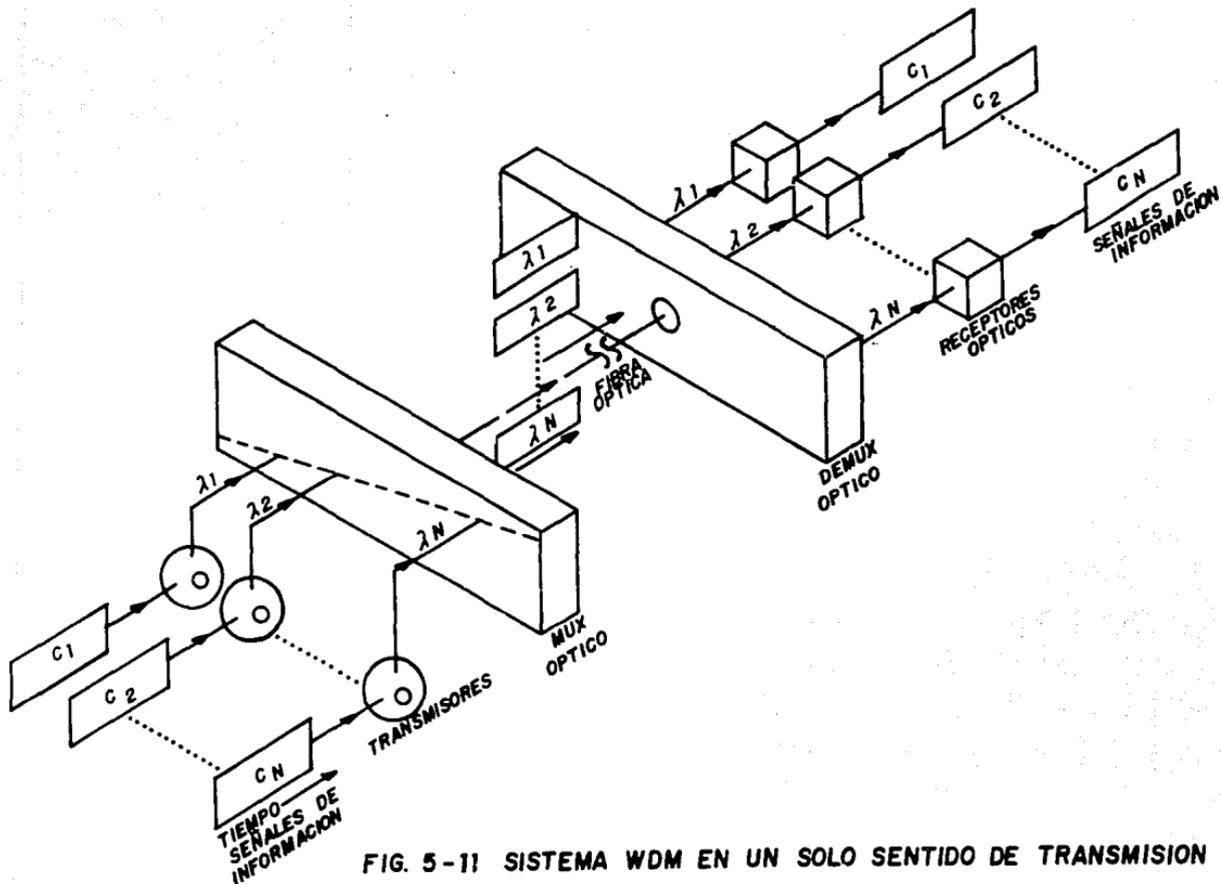


FIG. 5-11 SISTEMA WDM EN UN SOLO SENTIDO DE TRANSMISION

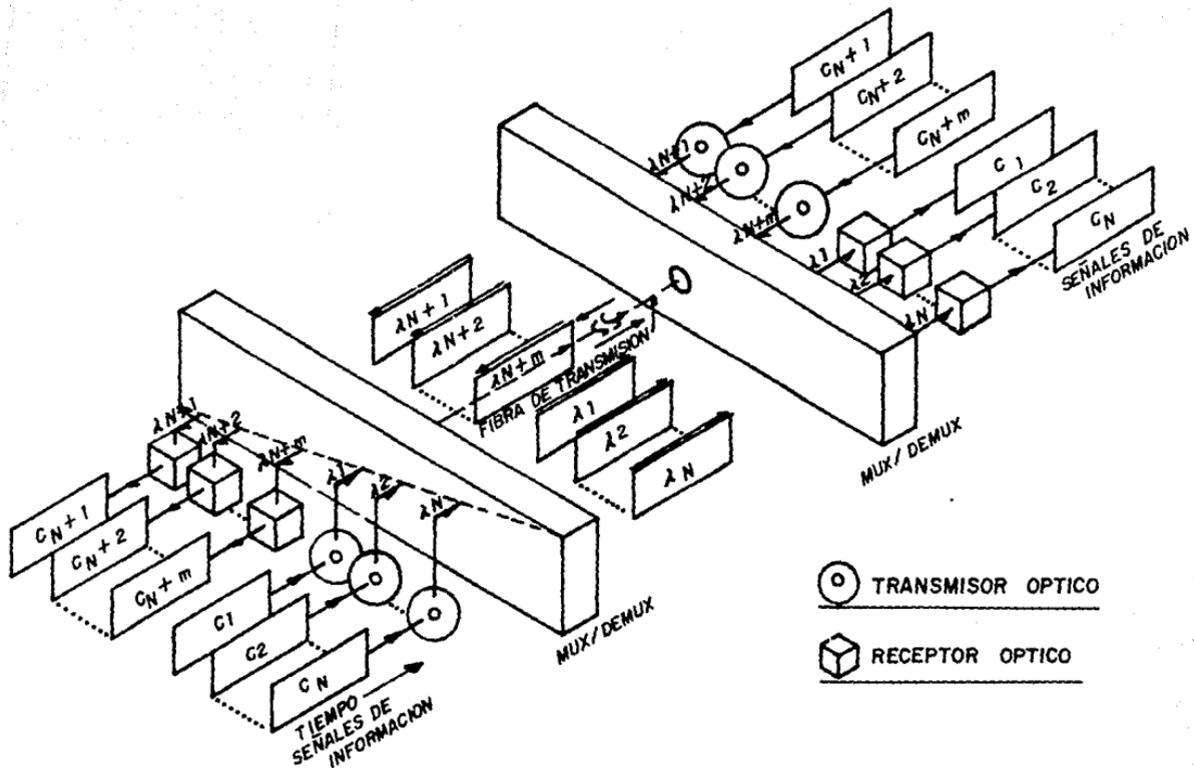


FIG. 5 - 12 SISTEMA WDM EN DOS SENTIDOS DE TRANSMISION

Ópticos emiten luz con una determinada longitud de onda. Los diferentes rayos de luz emitidos son combinados por el MUX-WDM, para ser transmitidos posteriormente por medio de la fibra óptica. En la etapa receptora las señales ópticas son separadas por un demultiplexor de longitud de onda (DEMUX-WDM), para ser conducidas a sus respectivos destinos.

Utilizando el multiplexaje por división en la longitud de onda es posible realizar transmisión de información en ambos sentidos, haciendo uso de una sola fibra (ver Fig. 5-12). Para lograr lo anterior, se deben utilizar diferentes longitudes de onda en cada dirección.

Como se observa, éste método es en cierta forma semejante al de FDM, con la variante de que éste sí hace uso completo del ancho de banda de la fibra por cada canal de información.

C A P I T U L O 6

CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA

En este capítulo se tratarán las consideraciones y procedimientos generales del diseño de un enlace de comunicaciones a través de fibras ópticas.

En la Fig. 6-1 se esquematiza de forma general, la metodología a seguir en el diseño de este tipo de sistemas. Los bloques en líneas continuas representan a los elementos principales (transmisor, receptor y cable de fibra óptica) de diseño en el sistema, y los bloques en líneas punteadas representan a los cálculos de diseño fundamentales en la determinación de las especificaciones de los elementos terminales. Los parámetros relevantes que tienen una influencia sobre estos cálculos, se muestran como entradas a los bloques mencionados.

Entre los requerimientos considerados en el modelo se incluyen los siguientes:

- Distancia

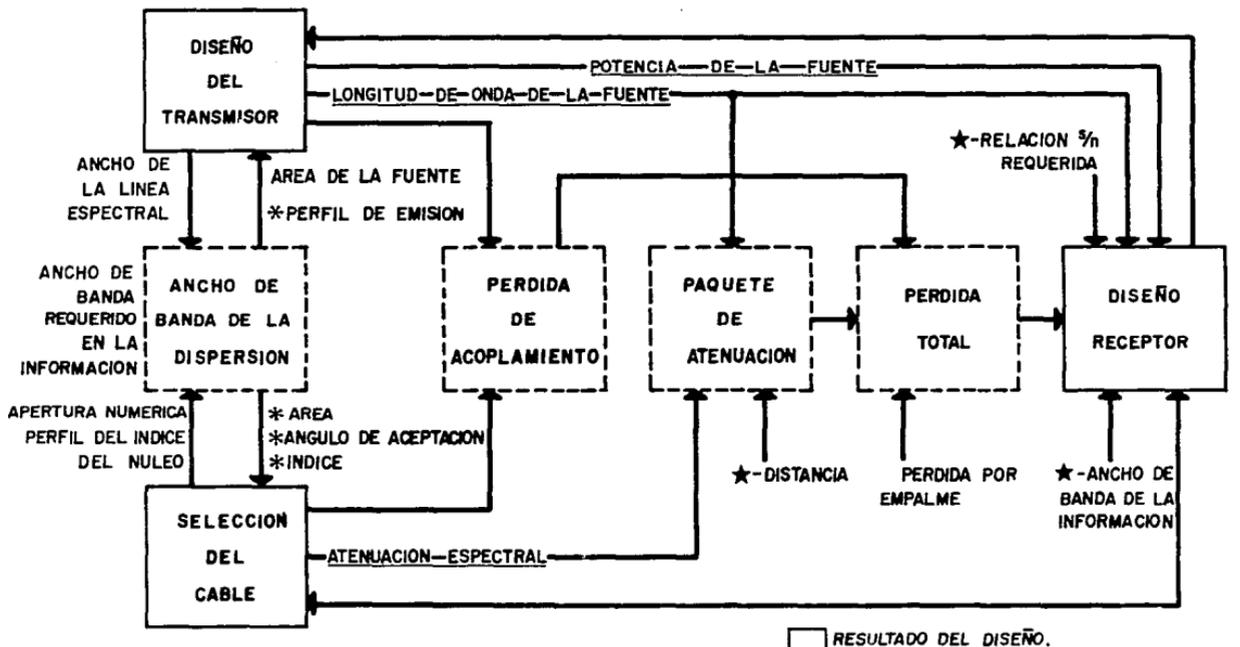


FIG.6-1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISEÑO DE UN ENLACE DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA

- Ancho de banda o tasa de datos
- Operación deseada (s/n o bit error rate)

Otras consideraciones que se deben hacer para la realización de un diseño completo son: el medio de operación, el tamaño, el peso, la potencia, la confiabilidad y el costo. No obstante, los requerimientos mencionados en primer lugar son las restricciones clave del sistema, ya que inicialmente son las que determinan la factibilidad de la implementación del diseño de un enlace de comunicaciones por fibra óptica.

El diseño de un enlace por fibra óptica, es un problema complejo en el sentido de que involucra muchas variables que están relacionadas entre sí. Por lo anterior, el proceso de diseño puede requerir de gran cantidad de iteraciones antes de darse por terminado, ya que la selección de un elemento terminal (transmisor, receptor o cable de fibra óptica) tiene un efecto directo sobre los restantes. Como ejemplos de la interrelación existente entre los diferentes factores del sistema, se observa que el diseño del receptor está fuertemente influido por la potencia óptica disponible en la recepción, la longitud de onda óptica, la potencia equivalente de ruido del detector, la salida señal/ruido deseada y el ancho de banda de información requerida. Por otra parte, la potencia óptica recibida está determinada por la potencia de la fuente, así como por las pérdidas totales del enlace (pérdidas de acoplamiento y de transmisión). A su vez, las pérdidas de acoplamiento de entrada se determinan primordialmente por

las características de la fuente (área de radiación, perfil de emisión) y por las características de la fibra (apertura numérica, área de recepción efectiva, índice de refracción del núcleo). Por otro lado, las pérdidas de transmisión se determinan por la característica de atenuación espectral de la fibra, la longitud de onda de emisión de la fuente, las pérdidas por empalmes y la distancia existente entre la fuente y el detector.

En el diseño de sistemas se tiene, por regla general, proponer las características de un cierto número de elementos y proceder en forma sistemática, partiendo de ésta base, a interrelacionar los datos conocidos con los parámetros restantes, para determinar las características de todos los elementos faltantes. La forma común seguida en el diseño de enlaces de transmisión vía fibra óptica, es proponer las características de dos de los elementos terminales del sistema y calcular las del tercer elemento, satisfaciendo los requerimientos del enlace. Por ejemplo, se puede proponer un receptor en particular y un cable de fibra óptica determinado, y partiendo de éstas premisas, calcular las características necesarias del transmisor para satisfacer los requerimientos de operación del enlace.

Si los cálculos resultantes de los parámetros son imprácticos, entonces las características de uno o de los dos elementos propuestos deberán ser modificadas, y por consecuencia, el cálculo repetido. De ésta manera, se lleva a cabo el proceso iterativo de diseño hasta que todos los elementos del sistema queden completamente definidos.

En secciones posteriores del capítulo se describen los procesos básicos de diseño de los principales elementos de un sistema de transmisión por fibra óptica: receptor, cable de fibra óptica y transmisor.

DISEÑO DEL RECEPTOR

En la Fig. 6-2 se presenta el diagrama de flujo del proceso general de diseño del subsistema receptor de un enlace de transmisión por fibra óptica. En él puede observarse la alternativa del diseño de un receptor analógico o de un receptor digital, dependiendo del tipo de información a transmitir (analógica o digital) en el sistema de comunicación.

En el diseño de un receptor analógico se deberá especificar el ancho de banda de la información que será transmitida, la relación señal a ruido requerida (SNR) y la cantidad de distorsión permisible. Por otro lado, si se requiere de un receptor digital, se debe especificar la velocidad de transmisión y la tasa de errores binarios esperada para el sistema. Así mismo, si se requiere de un sistema digital, se debe de considerar el formato de señalización y el esquema de detección de bit para calcular el ancho de banda de señal del receptor. El formato de señalización se refiere a los diferentes esquemas de código que podrían utilizarse: NRZ, RZ, Manchester, etc.; y el esquema de detección de bit se refiere a la elección de técnicas de detección posi-

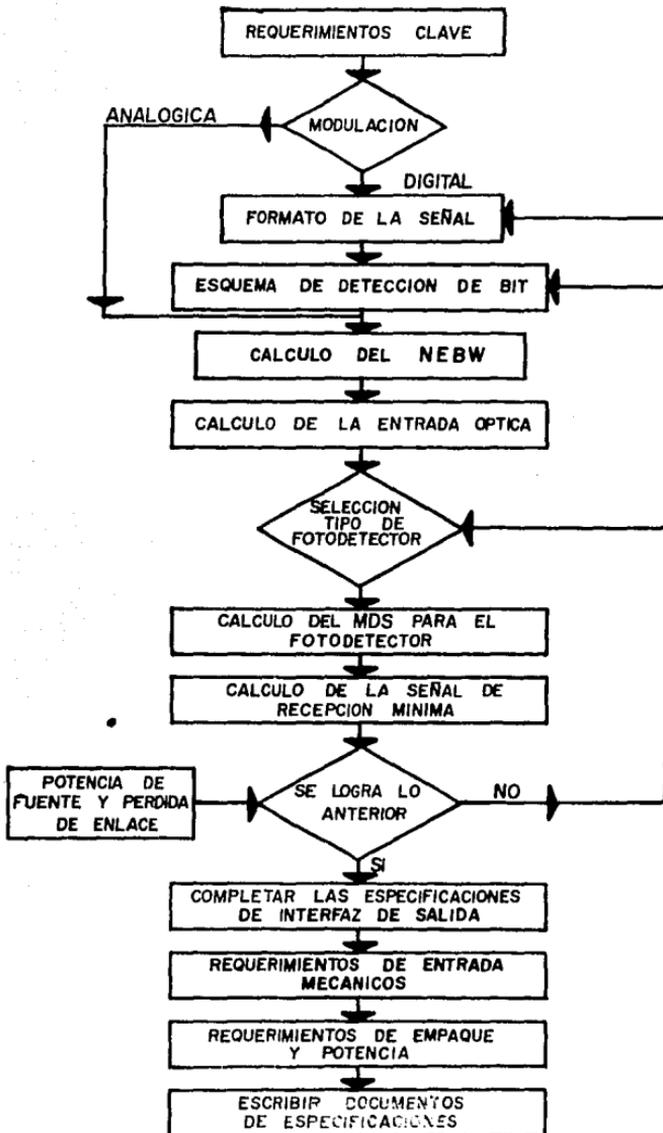


FIG. 6-2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DISEÑO DEL SUBSISTEMA RECEPTOR.

bles.

Los requerimientos de ancho de banda equivalente de ruido del subsistema receptor (NEBW), deben derivarse de la influencia del ruido estadístico de las características de filtrado y del ancho de banda de la señalización en el caso digital y del ancho de banda de la información en el caso analógico. El NEBW se necesita en el proceso de diseño para la determinación de la señal mínima detectable (MDS), basandose en el conocimiento de las densidades de potencia equivalente de ruido razonable a un ancho de banda de señal requerido. En sistemas donde se utiliza la conversión analógica-digital o digital-analógica, un ruido de cuantificación adicional debe sumarse a la densidad de potencia equivalente de ruido en el receptor.

La relación señal a ruido requerida en el receptor, para ajustarse a los requerimientos, deberá ser calculada por medio de la tasa de errores binarios y del NEBW para el caso digital, y para el caso analógico a través de la relación señal a ruido y del NEBW.

Posteriormente se debe elegir el tipo de fotodetector a utilizar en el subsistema: fotodiodo PIN o fotodiodo de avalancha (APD). Para lo anterior, se deben hacer consideraciones de confiabilidad, costo y requerimientos del medio ambiente que puedan afectar la operación del detector. Una vez que el fotodetector y la longitud de onda de la fuente hayan sido seleccionadas, la señal mínima detectable (MDS) puede ser calculada y usada para predecir la potencia de señal mínima requerida para lograr la rela-

ción señal a ruido (SNR) de entrada óptica proveniente de los requerimientos iniciales.

En este punto, se debe hacer una proposición razonable de la magnitud de la potencia de la fuente electroluminiscente y de la pérdida óptica del enlace, con el objeto de evaluar la factibilidad de la señal mínima requerida. Si no se alcanza la señal mínima requerida con un margen de tolerancia razonable, entonces se debe considerar la reelección del tipo de fotodetector.

Si un sistema digital es empleado, se puede cambiar el formato de señal y el esquema de detección de bit para bajar el ancho de banda de la señal requerida en el receptor, y de esta manera alcanzar mayor sensibilidad. Sin embargo, si las opciones se han agotado y la señal mínima requerida es todavía insatisfactoria, se hace necesario mejorar la potencia de la fuente y las suposiciones de pérdida del enlace. También se puede considerar como alternativa el multiplexaje o la disminución de los requerimientos iniciales.

Cuando la señal mínima requerida es alcanzada, se procede a complementar las especificaciones de la interfaz eléctrica de salida, la cual incluye requerimientos como el voltaje de salida. Por otra parte, también se deben considerar los requerimientos del acoplamiento mecánico a la entrada del receptor (tipo de conectores). Así mismo, las condiciones ambientales tales como la temperatura, radiación y humedad deben de ser consideradas junto con el ensamblado y los requerimientos de consumo. Para finalizar el proceso de diseño, se redacta un documento de especifica-

ciones que defina todos los requerimientos de operación del subsistema receptor.

ESPECIFICACIONES DEL CABLE DE FIBRA OPTICA

El proceso de selección de la configuración del cable óptico se inicia con la determinación de las necesidades básicas requeridas, tales como la distancia entre la fuente y el detector y el ancho de banda de la información a transferir. Con base en lo anterior, se propone una configuración de empaquetado de fibras especificando los parámetros siguientes:

- Número de fibras
- Apertura numérica efectiva de la fibra
- Area de empaquetado
- Perfil del índice del núcleo
- Longitud disponible máxima
- Atenuación a la longitud de onda de interés

Con los datos anteriores y la configuración supuesta de la fuente, se calculan las pérdidas totales del enlace esperadas en esta configuración (pérdidas por atenuación de la fibra y pérdidas por acoplamiento). Las pérdidas de entrada se basan en las características de la fuente electroluminiscente (incluyendo área y perfil de emisión), así como características del cable de

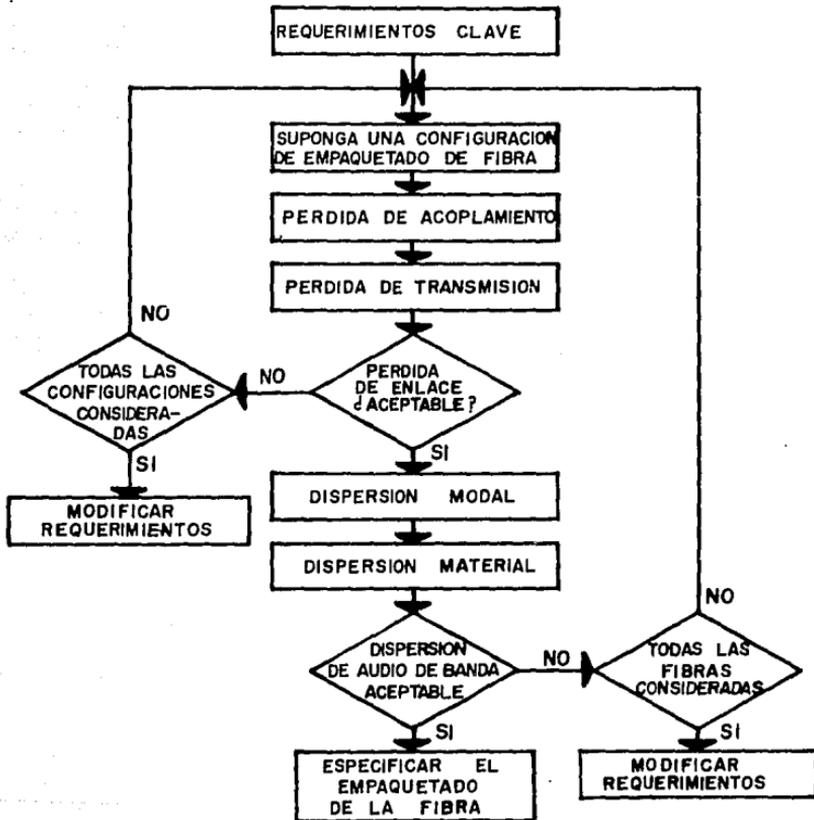


FIG.6 -3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SELECCION DE UNA CONFIGURACION DE CABLE OPTICO

fibras ópticas (incluyendo apertura numérica efectiva, área e índice de refracción).

Por su parte, las pérdidas de acoplamiento de salida se fundamentan en el índice de refracción de la fibra, el índice de refracción del medio entre el empaquetado y el detector y la superficie que ocupa el detector visto desde el cable. Los componentes básicos de las pérdidas de salida, incluyen reflexiones de Fresnel y pérdidas debidas a la iluminación no captada.

Las pérdidas de transmisión se pueden calcular en base a la distancia conocida y a la atenuación de la longitud de onda óptica de interés. No obstante, debido a que las fibras disponibles están en longitudes estándar menores a la distancia requerida, por lo general, se hace necesario empalmar varios segmentos; por ello, la estimación de las pérdidas de transmisión debe incluir las pérdidas ocasionadas por los empalmes realizados en el enlace.

Bajo la suposición de que el cable de fibras pueda ser encontrado con la satisfacción de los requerimientos del enlace, se debe asegurar que la dispersión modal y material sean adecuadas para el ancho de banda de información requerida. La dispersión material se determina mediante el ancho de línea espectral de la fuente y por las propiedades del material del núcleo. La dispersión modal se determina por la apertura numérica efectiva de la fibra y el perfil del índice del núcleo.

Después de asegurarse de que el ancho de banda y las propiedades de atenuación del empaquetado de fibras seleccionado son sa-

tisfactorias, se procede a complementar las especificaciones.

Además de la operación se debe dar una especial atención al medio dentro del cual debe operar el cable, ya que esto determinará el tipo de materiales del empaquetado.

En la Fig. 6-3 se ilustra el proceso básico para la selección de una configuración de cable óptico.

DISEÑO DEL TRANSMISOR

En la Fig. 6-4 se muestra el diagrama de flujo general del proceso de diseño del subsistema transmisor de un enlace de transmisión por fibra óptica.

Si la información a transmitir es digital, el diseño del transmisor se inicia con la determinación de la tasa de transferencia de datos requeridos y la de errores binarios. Con información analógica, los requerimientos clave son la relación señal a ruido, la distorsión de la señal y el ancho de banda de la información.

La longitud de onda de la fuente y los requerimientos de ancho espectral son influidos fuertemente por las características ópticas de la fibra seleccionada, las cuales son especificadas en la parte correspondiente al diseño del medio transmisor. A su vez, la longitud de onda y el ancho espectral máximo tienen gran influencia sobre el tipo de fuente en el subsistema.

Por su parte, la potencia de salida óptica acoplada requerida

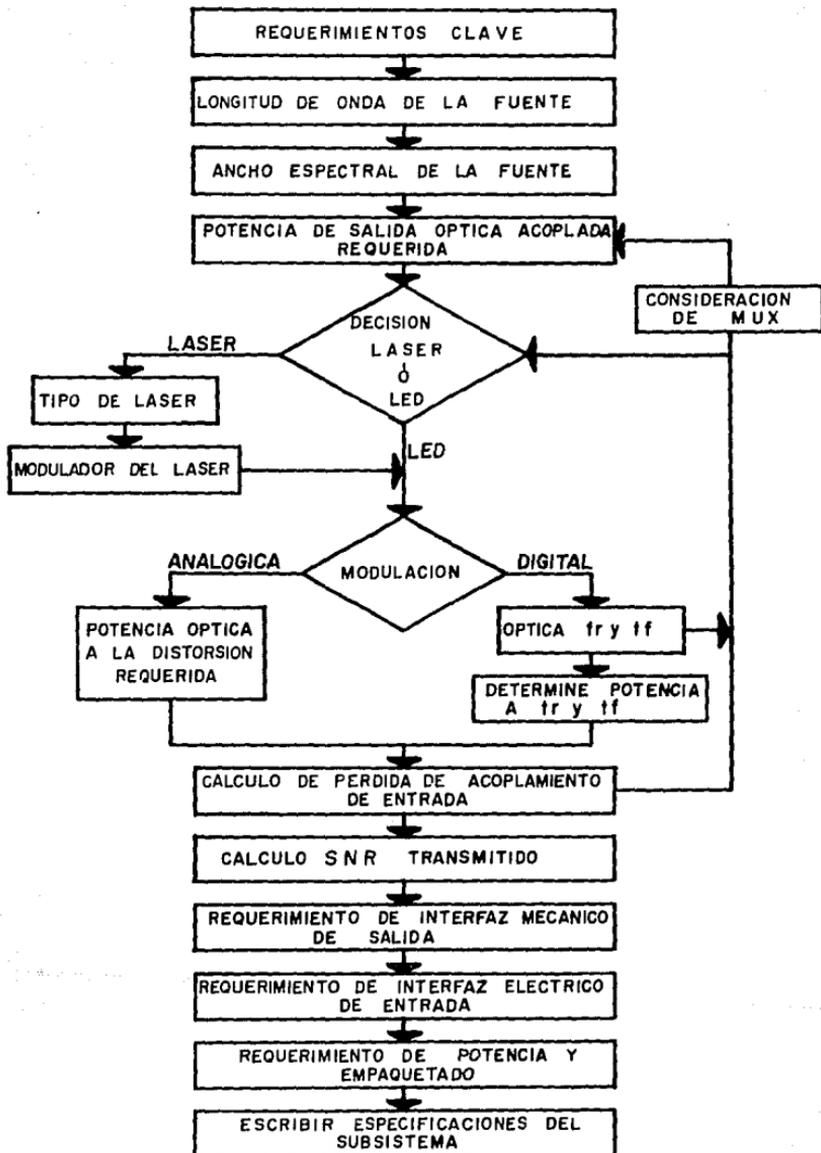


FIG.6-4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DEL DISEÑO DEL SUBSISTEMA TRANSMISOR.

se deriva del nivel de señal mínimo recibido en el detector y las pérdidas de transmisión de la fibra óptica, incluida la pérdida de acoplamiento de salida. Esta potencia de acoplamiento es posterior a las pérdidas de acoplamiento de entrada, y por ello puede afectar la selección de la fuente electroluminiscente, determinando las características de emisión aceptables en ésta.

El tipo de fuente electroluminiscente empleada está determinada principalmente por la potencia óptica requerida y también por parámetros como el ancho espectral, la velocidad y la linealidad.

El rango de las longitudes de onda de la fuente LASER que son de interés en fibras ópticas es muy limitado, por lo que el tipo de dispositivo seleccionado puede forzar a modificar la decisión sobre la longitud de onda, como se indica en la trayectoria de retroalimentación del diagrama de flujo de la Fig. 6-4. Al diseñar el subsistema también se debe tener en cuenta que los dispositivos LASER tienen varios grados de coherencia, por lo que los requerimientos de ancho espectral son de gran interés.

A su vez, como el LED es una fuente óptica no coherente, el ancho espectral es un factor importante en sistemas de gran longitud con velocidades de señalización altas. Se debe estar también informado de que la mayoría de las fuentes LED se agrupan alrededor de $0.9 \mu\text{m}$ de longitud de onda, con vecindad a una zona de absorción relativamente alta (0.92 m). Aquí la influencia potencial del cambio de longitud de onda debido a la temperatura se vuelve importante y debe reflejarse en las especificaciones

de tolerancia a las longitudes de onda establecidas en el diseño.

La decisión de utilizar una fuente LASER se acompaña de la necesidad de un modulador externo, excepto cuando es considerado un LASER semiconductor. En cambio, la salida de potencia de un LED es linealmente proporcional al impulso de corriente de entrada, por lo que no requiere de moduladores externos.

Siguiendo el diagrama de flujo se observa que en el caso analógico, el interés recae en la potencia de salida óptica disponible por la fuente, a un nivel de distorsión dado y a un ancho de banda de información fijado por los requerimientos. Con un sistema digital, el formato de señalización debe ser especificado (NRZ, RZ, Manchester, etc.) y deben derivarse los tiempos ópticos de subida y bajada (t_r y t_f respectivamente) para su compatibilidad con el formato de señalización mencionado.

Cuando las especificaciones de velocidad resultantes no son realistas con el tipo de fuente elegida, se tiene la opción de reconsiderar el formato de señalización, cambiar la elección del tipo de fuente, considerar multiplexaje o reducir la velocidad de transmisión.

Una vez que la potencia de la fuente ha sido calculada, se determina y compara la pérdida de acoplamiento de entrada con la potencia acoplada requerida especificada a la salida del procedimiento de diseño. Si la condición de potencia de salida óptica acoplada no se satisface, existen diversas opciones a considerar, como se ilustra en las trayectorias alternas sobre el diagrama

de flujo.

Si ya se seleccionó el tipo de fuente óptica compatible con los requerimientos de operación deseados, se procede a especificar la relación señal a ruido (SNR) basándose en los requerimientos de la SNR del receptor y en la degradación esperada en el enlace. Esta especificación induce, a su vez, a considerar parámetros como la estabilidad de la fuente de poder y ruido en la fuente óptica.

Los requerimientos de las interfaces de entrada y salida son finalizados, incluyendo parámetros como niveles de voltaje, impedancias, restricciones mecánicas, etc.. Así mismo, cualquier restricción del medio, de confiabilidad, de potencia o de empaquetado que pueda afectar la selección de componentes debe ser evaluado y deberá influir en el diseño de la configuración del sistema.

A manera de conclusión, se redacta un documento en el cual se definen todas las especificaciones de los requerimientos de operación del subsistema transmisor.

C A P I T U L O 7

MEDICION DE PARAMETROS DE TRANSMISION EN FIBRAS OPTICAS

El diseño e instalación de sistemas de comunicación por fibra óptica, hace uso de diversas técnicas de medición para la verificación de las características operacionales de los elementos que lo componen. De manera particular, la medición de los parámetros físicos y de transmisión de las fibras ópticas es una exigencia fundamental para la evaluación de las mismas, así como para la investigación experimental, el diseño de sistemas de transmisión y en su manufactura.

La elección de los parámetros de la fibra óptica (Fig. 7-1) cuyas mediciones se habrán de efectuar, está en función de las características de diseño del sistema y en las necesidades propias del mantenimiento de la correcta operación del mismo.

A continuación se presentan los fundamentos, limitaciones, ventajas e inconvenientes de algunos métodos de medición utilizados en la actualidad para medir los principales parámetros de transmisión en fibras ópticas. En particular, se contempla la me

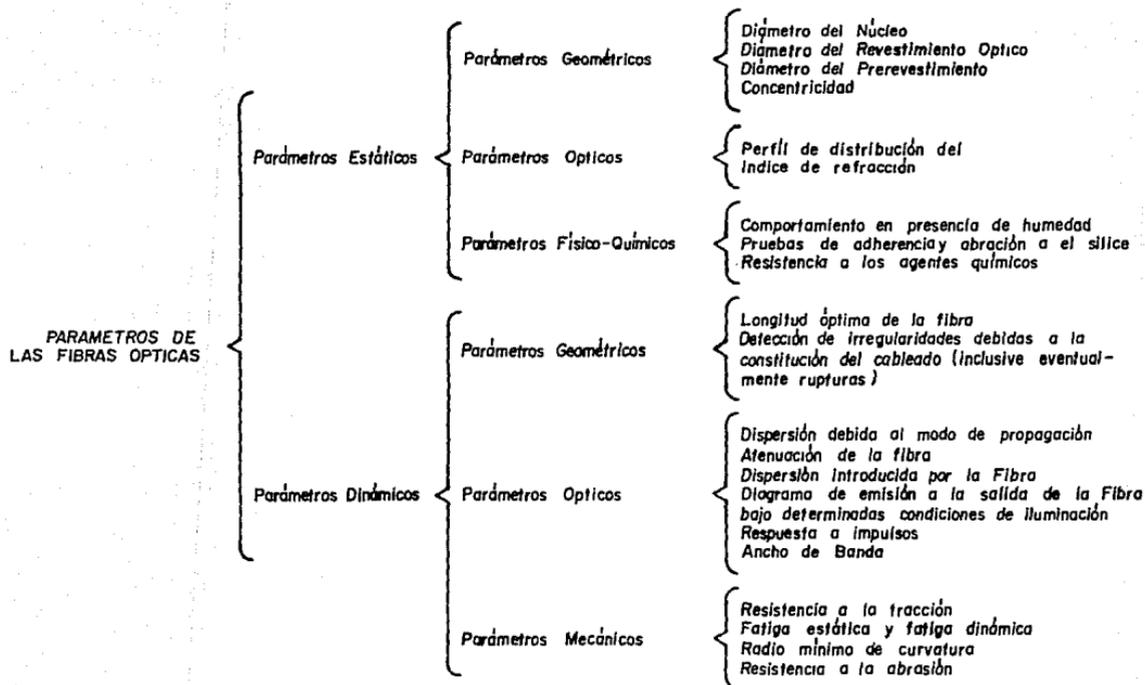


FIG. 7-1 CLASIFICACION DE LOS PARAMETROS DE LAS FIBRAS OPTICAS.

dición de la atenuación, del ancho de banda y la localización de fallas o cortes en la línea de transmisión.

La atención de éstos métodos de medición se centra en las fibras multimodo, y esto es debido a que los parámetros de atenuación y ancho de banda tienen un comportamiento mucho más crítico en éste tipo de fibras, que en las de modo único.

La medición exacta de las características de transmisión de las fibras multimodo, se enfrenta con la dificultad básica de que los distintos modos que se propagan por ellas presentan discrepancias en lo referente a atenuación y a diferencias de tiempo de propagación. Además este problema se complica debido a las transferencias de energía de un modo a otro, las cuales son llamadas acoplamiento de modos.

El acoplamiento de modos es consecuencia de perturbaciones en la configuración geométrica de las fibras; en las fibras de buena calidad se debe principalmente a factores externos, tales como las microcurvaturas y los empalmes. Este acoplamiento es el causante de la pérdida excesiva en los modos de orden elevado, por conversión de energía en radiación.

Las consecuencias de los efectos de la propagación multimodo son:

- La atenuación y el ancho de banda de la fibra no son parámetros totalmente definidos, sino que dependen de las condiciones de excitación y de las condiciones ambientales y mecánicas (cableado, tensión residual de tendido, empalmes

y curvaturas).

- La atenuación y el ancho de banda no son, en general, funciones lineales de la longitud, por lo que la extrapolación de los datos medidos a longitudes diferentes no es siempre significativa.

Por encima de una cierta longitud, que depende de la intensidad de acoplamiento de modos (longitud de acoplamiento), la transferencia de energía entre modos produce una distribución que se propaga sin variaciones, denominada distribución en régimen permanente. Una vez alcanzado éste estado, las pérdidas y el ancho de banda de la fibra toman valores bien definidos, por lo que se pueden realizar las mediciones de forma más confiable, ya que el parámetro bajo medida será exclusivamente dependiente de la fibra óptica e independiente de la distribución modal con que se haya inyectado la luz a la fibra.

Por lo anterior se concluye que la medición de los parámetros de transmisión en régimen permanente, es el estado adecuado para la realización de ésta función. Una forma sencilla de simular éste estado, es por el método de la fibra de referencia. El método consiste en intercalar entre la fuente y la fibra a medir, un tramo de fibra de una longitud superior a la necesaria para alcanzar el equilibrio modal (Fig. 7-2). Esta última debe tener, con la mayor aproximación posible, las mismas dimensiones y características que la que se encuentra bajo medida, de forma que su distribución modal en régimen permanente sea equivalente.

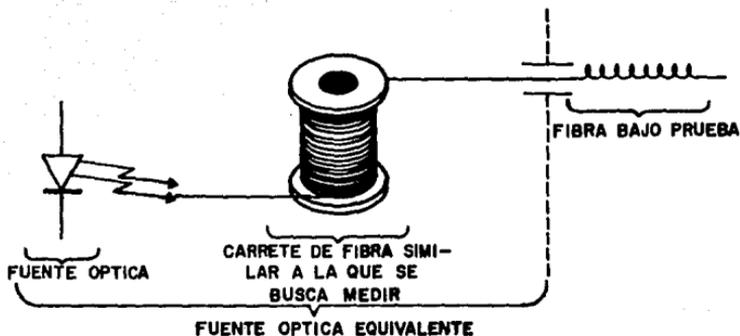


FIG.7-2 METODO DE LA FIBRA DE REFERENCIA

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN

Las señales luminosas que se propagan por medio de fibras ópticas experimentan una pérdida de energía en el transcurso de su recorrido por la línea de transmisión, como resultado de la acción de los mecanismos de atenuación (absorción y dispersión) que se llevan a cabo en ellas. Durante el proceso de fabricación de la fibra óptica, se está generalmente interesado en las contribuciones individuales de cada uno de los mecanismos de atenuación, pero durante la aplicación práctica en sistemas de comunicación, las pérdidas totales de la fibra es el parámetro que se desea conocer.

Las pérdidas de energía antes mencionadas dependen de la longitud de onda, por lo que a menudo es útil medir la atenuación en función de éste parámetro (espectro de pérdidas), para lograr la identificación de las regiones de bajas pérdidas adecuadas en los sistemas de transmisión. Esto es, la atenuación $A(\lambda)$ entre dos secciones de fibra (1 y 2) separadas por una distancia L , se define como:

$$A(\lambda) = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB})$$

siendo P_1 y P_2 la potencia óptica que atraviesa la sección 1 y 2 respectivamente, bajo condiciones de equilibrio modal.

Para el caso de una fibra uniforme, se define a la atenuación por unidad de longitud o coeficiente de atenuación $\alpha(\lambda)$, como:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad (\text{dB/Km})$$

el cual es independiente de la longitud de la fibra.

Para la medición de la atenuación se presentan los siguientes métodos:

- 1) Método de corte
- 2) Método de las pérdidas de inserción
- 3) Método de retrodispersión

El método de corte es una aplicación directa de la definición de atenuación, en el cual las potencias ópticas P_1 y P_2 se miden en dos puntos diferentes de la fibra sin modificar las condiciones de inyección de luz. Se considera a P_2 como la potencia que emerge al final de la fibra y a P_1 como la potencia que emerge en el punto donde se hace el corte de la misma.

El método de las pérdidas de inserción es similar al anterior, pero aquí se considera que P_1 es la potencia óptica radiada por el dispositivo electroluminiscente. En este caso, la atenuación medida corresponde al tramo de fibra insertada y a la conexión del dispositivo inyector de luz con la fibra bajo prueba. Resulta necesario, por lo tanto, la corrección de las mediciones obtenidas por medio de la sustracción de las pérdidas del conector, lo cual exige que la prueba sea repetitiva a fin de poder comparar las pérdidas en distintas ocasiones.

Por su parte, el método de retrodispersión emplea una forma indirecta, estimando la atenuación por medio de la comparación de los niveles de la potencia retrodispersada en diferentes secciones de la fibra.

-Método de corte

En la Fig. 7-3 se presenta el procedimiento general seguido por este método, el cual consiste en medir la potencia óptica en dos puntos diferentes de la fibra (extremo final de la fibra y extremo del punto de corte). Así, si P_2 y P_1 representan las salidas de potencia óptica del extremo final y del extremo final después del corte, respectivamente, el promedio de pérdidas $\alpha(\lambda)$ en dB/Km estará dado por:

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB/Km})$$

donde, L (en kilómetros) es la separación entre los dos puntos de medición.

La razón para seguir este procedimiento, es que es extremadamente difícil calcular la cantidad exacta de la potencia óptica que es enviada a través de la fibra, pero al hacer el corte muy próximo a la fuente electroluminiscente, se tiene básicamente la potencia de entrada a la fibra. Al aplicar este método es necesario tomar una serie de precauciones, entre las que se incluyen el tener iguales índices de refracción a la salida de la fibra en la superficie de detección, evitar inestabilidades en la fuente óptica y mantener las condiciones de envío de la señal luminosa.

Especial atención se debe poner en como es enviada a la fibra la potencia óptica, ya que diferentes condiciones de envío

pueden producir diferentes valores de pérdidas. Los efectos de los cambios en la apertura numérica (NA) y en el tamaño de la superficie de envío de la potencia óptica en la distribución modal, son mostrados en la Fig. 7-4. Si la superficie de envío es pequeña y la apertura numérica es menor que el núcleo de la fibra, se tiene que la potencia óptica se concentra en el núcleo; en éste caso, la contribución a la atenuación de la potencia óptica es mínima (Fig. 7-4.a). Por el contrario, si el tamaño de la superficie de envío es mayor que el núcleo de la fibra y la apertura numérica también lo es, parte del rayo incidente de luz cae afuera del núcleo de la fibra, por lo que la contribución a la atenuación de la potencia óptica es mucho mayor (Fig. 7-4.b).

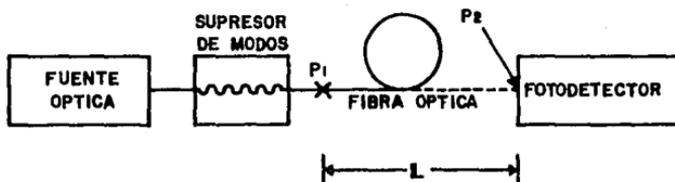


FIG. 7-3 ESQUEMATIZACION DEL METODO DE CORTE

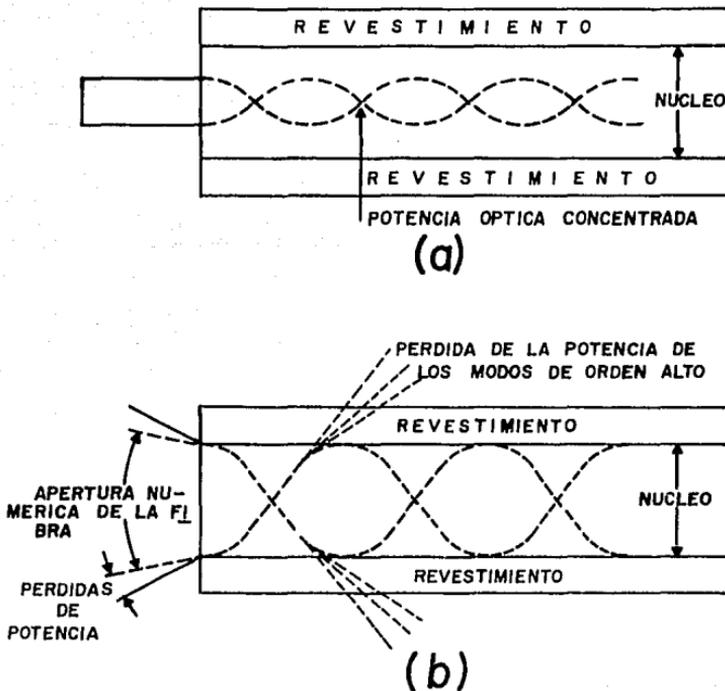


FIG. 7-4 EFECTOS DE LA APERTURA NUMERICA Y LA SUPERFICIE DE ENVIO EN LA DISTRIBUCION MODAL

Por medio de este método se tiene la posibilidad de caracterizar la fibra a una longitud de onda específica o en una gama espectral, dependiendo de los requerimientos de la medición.

La evaluación del coeficiente de atenuación por el método de corte, es una tarea típica de la fase de pruebas locales durante el control de calidad de las fibras ópticas; no obstante, durante la instalación y el mantenimiento es más frecuente utilizar una técnica de carácter no destructivo.

-Método de las pérdidas de inserción

Este método es muy parecido al tratado anteriormente, con la ventaja de ser una técnica de carácter no destructivo. En la Fig. 7-5 se esquematiza el procedimiento general para la evaluación de la atenuación de un cable óptico instalado. Para ello, se debe ajustar previamente el nivel de referencia mediante un conector de precisión asociado a un tramo pequeño de fibra, similar a la que se pretende evaluar, y a un mezclador modal.

La atenuación de la fibra bajo prueba está dada por la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{1}{L} (10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} - \alpha_c) \quad (\text{dB/Km})$$

donde P_2 es la potencia promedio en el extremo final de la fibra y P_1 es la potencia que emite la fuente óptica (por medio de la cual se calibra la escala del medidor de potencia), α_c son las pérdidas debidas a la presencia de elementos ópticos pasivos tales como: acopladores, conectores, multicanalizadores-demulticanalizadores, etc. que necesariamente contribuyen a las pérdidas totales del sistema, y L es la longitud del cable óptico en kilómetros.

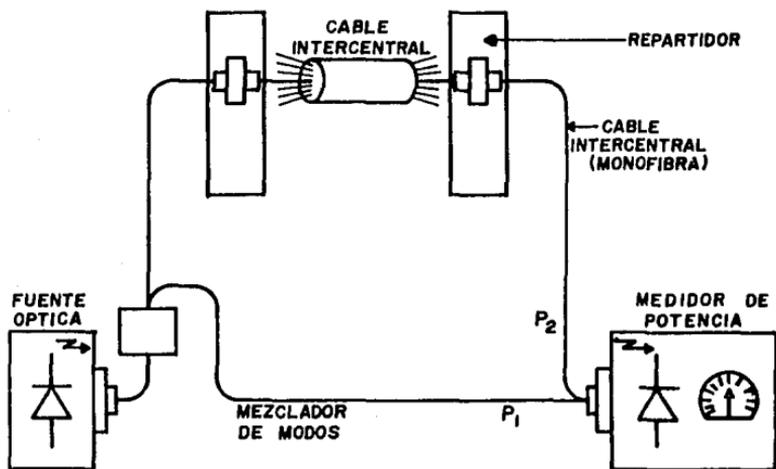


FIG. 7-5 METODO DE LAS PERDIDAS DE INSERCIÓN

El método de inserción es particularmente útil en la toma de medidas de cable ya instalado. Las limitaciones que presenta son las mismas a las de la técnica de corte con instrumentos de campo, con el agravante de la incertidumbre sobre las pérdidas exactas que introducen los elementos pasivos del sistema.

-Método de retrodispersión

La técnica de medición por retrodispersión consiste en inyectar un breve impulso luminoso de alta potencia en un extremo de la fibra y observar posteriormente, desde el mismo extremo, la señal resultante de la luz retrodispersada a lo largo de la fibra.

De la energía luminosa que se esparce en cada punto de la fibra, solo una fracción S se mantiene dentro del núcleo y regresa hacia el extremo por el cual se había inyectado. En otras palabras, cuando se introduce por un extremo de la fibra un impulso de luz, parte de su energía se dispersará en sentido contrario al de su incidencia, de manera que en el extremo de inyección se recibirá una señal $P(t)$ de forma exponencial cuya expresión matemática es:

$$P(t) = S E_0 \alpha_s \left(\frac{c}{n}\right) \exp\left(-2\alpha\left(\frac{ct}{2n}\right)\right)$$

donde:

$P(t)$ = Potencia de retrodispersión recibida en función
del tiempo

S = Fracción de potencia óptica que regresa hacia el
extremo de inyección

E_0 = Pulso de energía transmitido

α_B = Pérdidas de dispersión (nepers/m)

c = Velocidad de la luz

n = Índice de refracción del núcleo

α = Atenuación de la fibra (nepers/m)

Un montaje típico para la medición de la atenuación por este método es presentado en la Fig. 7-6; consta esencialmente de tres partes: un generador de impulsos ópticos, un fotodetector de bajo nivel de ruido y un acoplador bidireccional. Así mismo, requiere de un amplificador-integrador (para mejorar la relación señal/ruido) y una unidad de presentación o registrador gráfico.

Conociendo la velocidad de propagación de la luz en la fibra, se puede calibrar la escala de tiempo de un osciloscopio en unidades de longitud de ésta, obteniendo una figura que nos muestra la señal retrodispersada, es decir, el comportamiento de la luz a lo largo de la fibra (ver Fig. 7-7).

Como los impulsos retrodispersados recorren una determinada longitud de fibra dos veces (ida y vuelta), la señal observada corresponde a dos veces el tiempo de recorrido, por lo que la a-

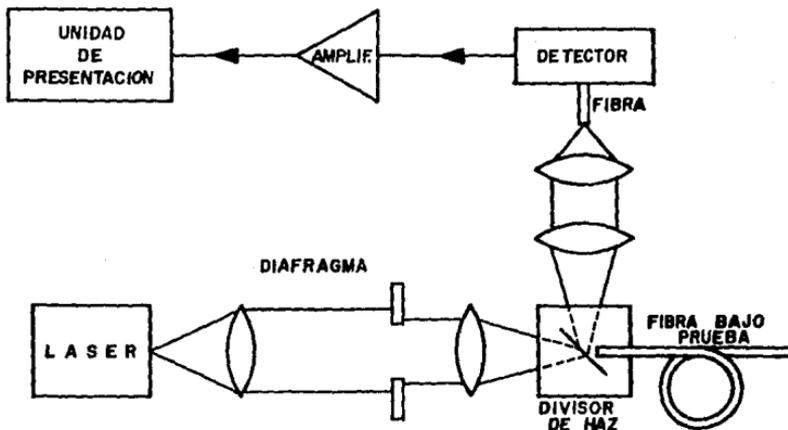


FIG. 7-6 ESQUEMA DEL SISTEMA DE MEDICION DE ATENUACION POR EL METODO DE RETRODISPERSION

tenación de la fibra puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{20}{(t_s - t_o) \cdot v_g} \log_{10} \frac{P_s}{P_e} \quad (\text{dB/Km})$$

donde:

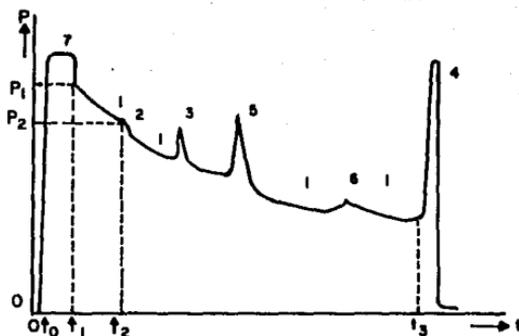
v_g = Velocidad de propagación de la luz en la fibra

t_s = Tiempo de salida del impulso de luz de la fibra
(Km/s)

t_o = Tiempo inicial

P_s = Potencia óptica de salida

P_e = Potencia óptica de entrada



1.-CURVA PARA UNA SECCION DE LA FIBRA SIN FALLAS

2.-CAMBIO DE ATENUACION (EMPALME)

3.-REFLEXION EN LA FIBRA

4.-REFLEXION POR TERMINACION

5.-CAMBIO EN LA ATENUACION MAS REFLEXION

6.-CAMBIO DE ATENUACION DEBIDO A FIBRAS CON DIFERENTES RESPUESTAS

7.-REFLEXION EN EL INICIO DE LA FIBRA

FIG.7-7 RESPUESTA DE LA RETRODISPERSION DE LA SEÑAL OPTICA OBTENIDA EN LA PANTALLA DEL OTDR

Este método no es destructivo y sólo necesita un extremo de la fibra para hacer la medición, además de ser bastante repetitivo. Como desventajas, no permite medir la atenuación en función de más de una longitud de onda y trabaja con señales muy bajas, obligando al uso de procesos sofisticados de filtrado.

METODOS DE MEDICION DEL ANCHO DE BANDA

Varios mecanismos de alargamiento de impulso están presentes en una fibra óptica, incluyendo la dispersión modal y la dispersión introducida por el material. Para el caso de fibras multimodo, el ancho de banda está limitado básicamente por la dispersión modal. Sin embargo, en éste tipo de fibras con anchos de banda mayores a unos cuantos GHz-Km, la dispersión modal es pequeña comparada con la dispersión cromática de la fuente luminosa de ancho espectral de unos cuantos nm. En el caso de fibras unimodo, la dispersión es mucho más pequeña y es debida fundamentalmente a la dispersión cromática.

Independientemente del tipo de fibra utilizada, resulta cierto el hecho de que una pequeñísima desviación de su perfil óptico produce una gran reducción en su capacidad de ancho de banda. Además se debe tener en cuenta, que el perfil óptico de una fibra no lo es a diferentes longitudes de onda, por lo que la dependencia espectral de la dispersión modal tiene que medirse si las fibras son utilizadas en más de una longitud de onda.

Existen básicamente dos técnicas que permiten la determinación de la capacidad de transporte de información de la fibra. Una consiste en medir la respuesta impulso en el dominio del tiempo $g(t)$, y la otra, en obtener la función de transferencia de modulación en el dominio de la frecuencia $G(w)$. La respuesta impulso y la función de transferencia de modulación están ligadas por la transformada de Fourier, por lo que es posible pasar de una a otra por medios matemáticos. Se ha demostrado en la práctica que si las dos mediciones se efectúan en las mismas condiciones de funcionamiento, deberán conducir a resultados idénticos.

-Medición en el dominio del tiempo

La forma más simple de obtener la respuesta al impulso $g(t)$, es transmitir un impulso óptico muy breve en la fibra y detectar su salida en el extremo opuesto para hacer la comparación del ancho del mismo.

La Fig. 7-8 muestra un arreglo común para medir el ancho del pulso en una fibra multimodo, causado por la dispersión modal a una longitud de onda discreta.

Las fuentes ópticas más utilizadas en éstos arreglos son LASER's de semiconductores compuestos, los cuales pueden cubrir una amplia región espectral (por ejemplo de 0.8 a 1.4 μm). En la detección del pulso óptico se requiere de detectores de muy

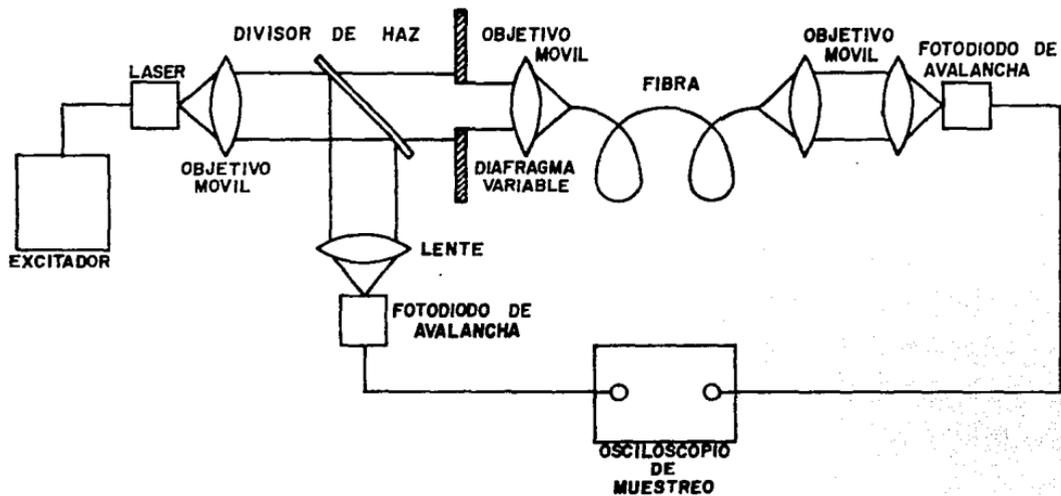


FIG.7-8 ARREGLO TIPICO PARA MEDIR LA RESPUESTA IMPULSO DE UNA FIBRA OPTICA

alta velocidad, por lo que regularmente se utilizan fotodiodos de avalancha. El divisor de haz permite que el pulso enviado sea monitoreado para la medición de su ancho. A igual que en la medición de pérdidas en la fibra, las condiciones de lanzamiento del pulso tienen que ser cuidadosamente controladas. La posición del haz y el ángulo de entrada deben de escogerse para: a) obtener la máxima eficiencia de acoplamiento óptico para el modo fundamental en una fibra unimodo; b) simular las condiciones de distribución en régimen permanente para el caso de fibras multimodales.

El análisis matemático en la técnica del dominio del tiempo considera que si el impulso de entrada fuera un impulso de Dirac, la señal de salida sería la respuesta al impulso de la fibra. En condiciones reales los impulsos pueden aproximarse mediante una forma gaussiana, de tal manera que es válida la siguiente relación:

$$\sigma_f^2 = \sigma_s^2 - \sigma_e^2$$

siendo σ_f , σ_s y σ_e los valores cuadráticos medios de los anchos de la respuesta al impulso, del impulso de salida y del impulso de entrada respectivamente.

El ancho de banda óptico (B) a -3 dB está dado por la siguiente fórmula:

$$B = \frac{0.187}{\sigma_f \text{ (ns)}} \quad \text{(GHz)}$$

En ésta técnica el análisis se complica si los impulsos son de forma irregular, por lo que $g(t)$ solo se obtiene por deconvolución, y el ancho de banda por la transformada de Fourier de $g(t)$.

-Medición en el dominio de la frecuencia

La otra alternativa para determinar el ancho de banda es, como se mencionó anteriormente, la técnica en el dominio de la frecuencia.

A partir de la transformada de Fourier puede determinarse la función de transferencia $G(w)$ de una fibra, conociendo $g(t)$ de la medición. Errores experimentales y de cálculo reducen la precisión de ésta medida, por lo que es mejor medir $G(w)$ directamente en el dominio de la frecuencia. Dada la característica compleja de $G(w)$, es necesario determinar su amplitud y fase. Lo primero se puede lograr mediante un analizador de redes, un voltímetro vectorial o un analizador de espectros. Sin embargo, para la obtención de la fase el análisis no es tan simple, ya que ésta varía de manera directa con variaciones rápidas en la frecuencia debido a la presencia en la fibra de variaciones lí-

neales y no lineales de fase. Para superar ésta dificultad se han propuesto varios métodos, entre los que destacan:

- Sustraer el desplazamiento de fase lineal en el canal de referencia del equipo de medición (por ejemplo el analizador de redes), insertando en éste canal una fibra unimodo que produzca el mismo retardo de propagación en la fibra bajo prueba.
- Transmitir a la fibra, al mismo tiempo, dos señales de frecuencia distinta para observar la diferencia de fase (fase diferencial) entre las dos frecuencias adyacentes.

En la Fig. 7-9 se muestra un esquema típico para la medición de la respuesta al impulso en el dominio de la frecuencia. En éste circuito, la fuente óptica es modulada por una señal senoidal que proviene de un generador de barrido (incluido en el circuito analizador). La salida de la fibra es detectada mediante un fotodiodo, cuya señal de salida alimenta al segundo puerto del circuito analizador, el cual genera la función de transferencia $G_1(\omega)$. La medición es repetida para una fibra de corta longitud, produciendo una segunda función de transferencia $G_2(\omega)$. Finalmente, la división entre las funciones $G_1(\omega)$ y $G_2(\omega)$ determina la función de transferencia de la fibra $G(\omega)$:

$$G(\omega) = \frac{G_1(\omega)}{G_2(\omega)}$$

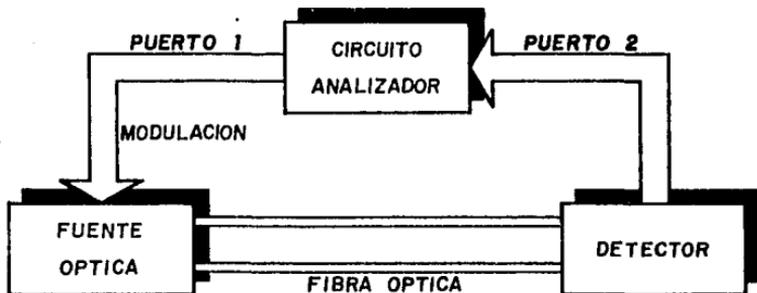


FIG. 7-9 MEDICION DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

En la Tabla 7-1 se hace un resumen de las ventajas y desventajas de estas técnicas de medición del ancho de banda de una fibra óptica. Independientemente de la técnica empleada, debe de enfatizarse que la respuesta al impulso de una fibra no es lineal a la longitud de ésta, por lo que las extrapolaciones a diferentes longitudes no son válidas.

	TECNICA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	TECNICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA
VENTAJAS	1.-SENCILLEZ EN LA MEDICION 2.-MEJOR VISUALIZACION DEL PROCESO DE ENSANCHAMIENT O DEL PULSO	1.- MAYOR VERSATILIDAD EN LA MEDICION 2.-LAS MEDICIONES PUEDEN A BARCAR UNA AMPLIA REGION ESPECTRAL 3.-LOS VALORES MEDIDOS DAN DIRECTAMENTE LA INFORMA CION REQUERIDA
DESVENTAJAS	1.-DIFICULTADES PARA LA GE NERACION DE PULSOS OPTI COS SUFICIENTEMENTE AN GOSTOS 2.-SE REQUIERE MUY ALTA VE LOCIDAD DE RESPUESTA EN LOS FOTODETECTORES 3.-PROBLEMAS EN LA NO-LI NEALIDAD EN LOS DISPOS ITIVOS	1.-DIFICULTADES PARA LA OB TENCION DE LA FASE DE LA RESPUESTA AL IMPUL SO 2.-SE REQUIERE DE UN ESQUE MA DE MEDICION MAS SO FISTICADO

TABLA 7-1 COMPARACION DE LAS TECNICAS DE MEDICION DEL ANCHO
DE BANDA DE UNA FIBRA OPTICA

DETECCION Y LOCALIZACION DE FALLAS EN LAS FIBRAS

Puede ocurrir que durante las etapas de instalación y de servicio del cable óptico, se ocasione el resquebrajamiento o la rotura de alguna fibra. Estos defectos pueden ser localizados mediante la técnica de retrodispersión, la cual es una de las técnicas de medición de la atenuación analizadas anteriormente.

Con el enfoque de la detección y localización de fallas en las fibras, se describe a continuación la técnica de retrodispersión, que utiliza como equipo de medición el Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR).

En esencia un OTDR es un circuito unidimensional cerrado de radar óptico, que opera enviando pulsos LASER periódicos de muy corta duración hacia una terminal de la fibra bajo prueba, monitoreando la amplitud y característica temporal de la luz que regresa al origen.

En la Fig. 7-10 se esquematiza la configuración de un OTDR, cuya fuente emisora es normalmente un diodo LASER semiconductor y el detector un fotodiodo de avalancha (APD). El diodo realiza la conversión electro-óptica, alimentando con pulsos de luz a la fibra bajo prueba a través de un acoplador óptico direccional. La luz reflejada por la fibra bajo prueba es dirigida por el acoplador óptico al fotodetector de avalancha, quien hace la conversión opto-eléctrica para enviar la información al receptor, la cual pasa a su vez a un osciloscopio donde se visualiza el comportamiento de la señal.

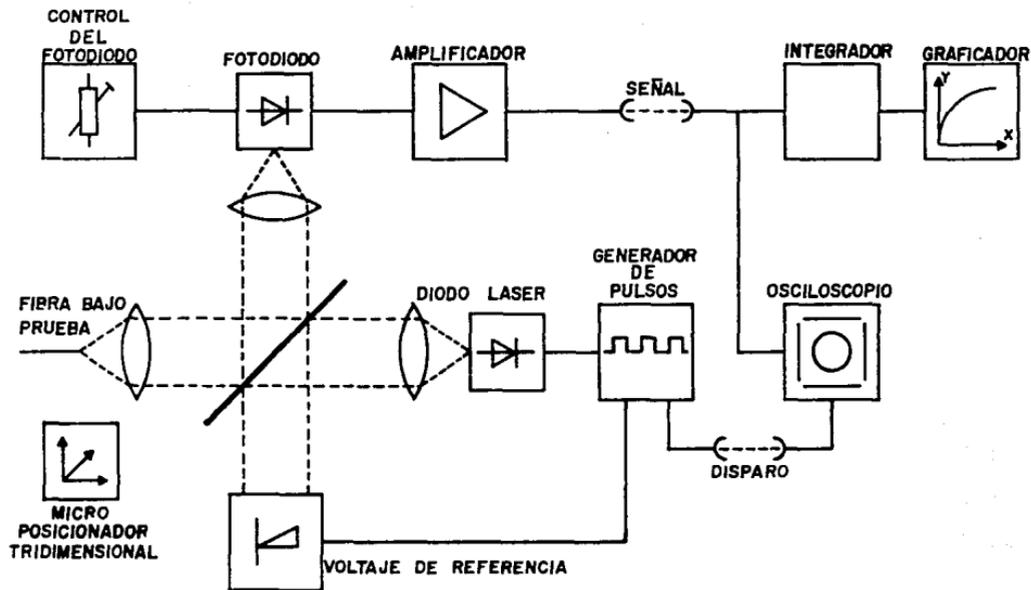


FIG. 7-10 DIAGRAMA A BLOQUES DE UN REFLECTOMETRO OPTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Si durante la propagación del pulso a lo largo de la guía de onda óptica se encontrara una fractura, una imperfección o el extremo final de la fibra, el pulso experimentará una dispersión de Rayleigh o una reflexión de Fresnel, dando lugar a las variaciones en la forma de onda monitoreada en el detector.

Una forma de onda típica detectada en la pantalla del osciloscopio del OTDR se muestra en la Fig. 7-7; a partir de la cual se puede determinar la atenuación, la localización de fallas y la longitud del cable óptico bajo prueba.

La atenuación de la fibra puede calcularse evaluando la curva exponencial de una sección sin variaciones fuertes de retrodispersión, a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{5}{(t_2 - t_1)} \cdot \frac{2n}{c} \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB/Km})$$

donde:

P_1 y P_2 = Potencia óptica medida en el instante t_1 y t_2

c = Velocidad de la luz

n = Índice de refracción del núcleo

La longitud (L) del cable óptico bajo prueba puede determinarse a partir del intervalo de tiempo total, del instante t_0 al instante t_3 que marca la terminación de la fibra (ver Fig. 7-7), por medio de la siguiente expresión:

$$L = \frac{c}{2n} (t_3 - t_0) \quad (\text{Km})$$

C A P I T U L O 8

CARACTERISTICAS GENERALES DE OTROS SISTEMAS DE COMUNICACION

En éste capítulo se explicarán brevemente algunas de las características de los sistemas de comunicación tradicionalmente usados, con el fin de apreciar las ventajas que presenta el sistema de comunicaciones por fibra óptica.

Como sabemos, uno de los factores de más peso en la selección de un sistema de comunicación es el costo que éste tenga en comparación con los beneficios que de él se obtenga. Y es en éste aspecto donde las comunicaciones ópticas ofrecen un gran porvenir.

Los sistemas sobre los cuales girará el desarrollo de éste tema son: cable coaxial, par de cobre y sistemas de radio enlace (microondas y satélite).

CABLE COAXIAL

El cable coaxial está constituido por uno o más tubos coaxiales, los cuales a su vez están formados por dos conductores, uno de forma tubular (conductor externo) y el otro de forma filiforme (conductor interno) colocados sobre un mismo eje y aislados entre sí por polietileno o una combinación de aire polietileno.

El conductor interno normalmente consiste de un alambre de cobre sólido y el conductor externo de una malla de cobre envolvente, que normalmente va conectado a tierra y constituye un blindaje estático y a alta frecuencia, magnético. Para algunas aplicaciones se utilizan conductores de aluminio en vez de conductores de cobre.

En cables coaxiales, los requisitos más estrictos son hechos sobre el aislamiento entre conductores, ya que el conductor central siempre debe permanecer en el centro del tubo externo, por lo que dicho aislamiento es de polietileno puesto que tiene un bajo factor de pérdidas y un alto esfuerzo dieléctrico.

Un tubo coaxial puede transmitir una amplia banda de frecuencias sin interferencias. Esto se debe a que la corriente a altas frecuencias está siendo comprimida en una capa superficial del conductor. Como el conductor completo no es usado para la transmisión, la atenuación aumenta con el incremento de la frecuencia; sin embargo, los amplificadores intermedios compensan estas pérdidas dependientes de la frecuencia.

Los sistemas de cable coaxial pueden ser: analógico o digital. El sistema analógico utiliza la técnica de multicanalización por división de frecuencia (FDM). En éste procedimiento los canales de señales de banda base se multicanalizan en frecuencia, escogiéndose la portadora de manera que las señales moduladas resultantes ocupen bandas de frecuencia adyacentes y separadas, la señal compuesta, resultado de la suma de las señales moduladas individuales, es transmitida como una sola señal analógica de mayor ancho de banda. En el receptor, los canales son de modulados para hacerlos reconocibles y distribuidos a los diferentes usuarios.

Los sistemas digitales (sistemas por modulación de pulsos codificados, PCM), están basados en la multicanalización por división de tiempo (TDM), lo cual implica que la señal sea convertida en pulsos que describen su amplitud y su frecuencia.

En el receptor, los pulsos se convierten a la señal analógica que fue transmitida originalmente.

Una ventaja de los sistemas digitales es su relativa insensibilidad a la interferencia, disturbios y ruido, lo que permite mayores distancias entre estaciones de amplificación, comparadas con aquellas de los sistemas analógicos.

PAR DE COBRE

El par de cobre se caracteriza por tener dos conductores que forman el enlace entre transmisor y receptor. Los cables están formados por un número determinado de alambres aislados (el número depende de la aplicación), el material con el cual son construidos puede ser cobre, aluminio o aleaciones de ambos, éste material es estirado hasta obtener el diámetro requerido, dichos diámetros suelen ser generalmente 0.4, 0.51, 0.64 ó 0.91 mm.

Los pares de alambre suelen estar aislados individualmente, éste aislamiento consiste en papel con pegamento, el cual envuelve en forma de espiral el alambre. El espesor del aislamiento y el material de papel utilizado determinan la capacitancia del cable. Adicionalmente, los diferentes alambres son torcidos por pares o cuadretes, con el propósito de anular los campos magnéticos producidos por la corriente que circula por ellos. Los pares o cuadretes son colocados en capas concéntricas hasta formar el núcleo del cable.

La cubierta del cable es una capa homogénea de metal o plástico que encierra al núcleo del cable, para protegerlo de interferencias externas (golpes, flexión, ambiente, compresión, etc.). Algunos materiales utilizados en la cubierta son : plomo, aluminio, polietileno y cloruro de polivinilo (PVC).

Se suele colocar una armadura de alambres de acero o flejes en forma de espiral alrededor de la cubierta, con el fin de proporcionar una mayor protección mecánica. Asimismo suele colocar-

se una pantalla cuya función es la de proporcionar al cable una mayor protección contra campos magnéticos y eléctricos externos. La pantalla consiste de una funda de metal o papel metálico, el cual forma parte de la cubierta. La pantalla es por lo general hecha de papel aluminio y es colocada a lo largo del núcleo del cable, para el caso de cables flexibles, la pantalla es una malla de alambre de cobre.

En el caso de cables autoportados o aéreos se añade un cable de acero integrado a la cubierta, ésto con el fin de permitir la suspensión de cables en los postes.

RADIO ENLACE

En un sistema de radio enlace se emplea el espacio atmosférico como medio de transmisión, por lo que, al elegir la ubicación para las estaciones de radio elevadores la exigencia primaria es que exista espacio libre entre dichos emplazamientos. Las distancias entre los repetidores varían según sean las condiciones topográficas. El comportamiento en transmisión debe por lo tanto calcularse individualmente para cada salto de radio. La radio frecuencia, antena, cable de alimentación (guía de ondas), equipo relevador de radio e incluso los obstáculos y superficies reflejantes, influyen sobre el cálculo.

Puesto que todas las ondas de radio emplean el mismo medio de propagación, existe el riesgo de que las señales de saltos de ra

dios contiguos interfieran entre sí. Con objeto de mantener el nivel de las señales de interferencia a un nivel despreciable, los diferentes enlaces de radio deben separarse entre sí, asignándoles al tiempo de su planeación, diferentes frecuencias y/o practicando una discriminación adecuada de antenas o un apantallamiento topográfico.

Un enlace por radio se planea de forma que el desvanecimiento sea prácticamente despreciable. Después de la planeación de las rutas de radio enlace (ubicación de las estaciones y selección del equipo), se evalúa el comportamiento de transmisión del radio enlace antes de que el proyecto pueda ejecutarse. Esta evaluación se hace generalmente con los siguientes cálculos y en el orden que se citan a continuación:

- 1.- Cálculo de ruta, para definir los parámetros de los equipos.
- 2.- Cálculo del ruido, para comprobar las características de transmisión.
- 3.- Cálculo de interferencias, al establecer el plan de frecuencias.

Para ésta tarea de planificación se requiere una serie de medios auxiliares. Uno de ellos es la computadora, que se emplea para los cálculos. La experiencia ha demostrado que la computadora es un auxiliar invaluable para el trabajo de planificación, principalmente debido a la gran extensión de los cálculos y de

su caracter repetitivo. Es muy importante además la seguridad de los cálculos; los errores en el cálculo, que nunca pueden evitarse al desarrollarlos manualmente, no se descubren sino hasta que el proyecto se realiza y el corregir errores puede resultar costoso.

Otra modalidad de radio frecuencia es la utilización de satélites, cuya función es: recepción, amplificación y transmisión de la señal recibida.

Los satélites domésticos, que son los satélites utilizados para comunicaciones comerciales, tiene de 12 a 24 transponders (canales) asignados dentro de cada banda de frecuencia. En el enlace de subida la señal es transmitida a una frecuencia cercana a los 6 GHz y con un ancho de banda de 36MHz. Esta señal es recibida por el satélite, amplificada, trasladada en frecuencia y retransmitida a una frecuencia de 4 GHz y con el mismo ancho de banda.

Los métodos de acceso al satélite son diversos, el método más utilizado es el llamado acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), en el cual se les asigna a las estaciones terrestres canales específicos y para transmitir o recibir deben utilizar estas frecuencias. La estación terrestre transmitirá una señal modulada en frecuencia (FM) utilizando una portadora específica del intervalo de de 6 GHz. La señal de banda base consta de un cierto número de canales de 4 KHz multicanalizados por división de frecuencia, esto mismo sucede con otras estaciones terrenas que compartan el mismo transponder, ocupando bandas adyacentes

las señales de banda base de las diferentes estaciones terrenas, cubriendo así la banda completa de 36 MHz.

Después de mencionar las características generales de los diferentes medios de transmisión que utilizan los sistemas de comunicaciones actuales, pasaremos a analizar algunas de las ventajas y desventajas de éstos en relación a los sistemas ópticos.

Como se mencionó anteriormente, la atenuación en las fibras ópticas es pequeña, permitiendo que el cable de fibra óptica pueda ser instalado en longitudes de varios kilómetros sin necesidad de emplear repetidores intermedios, lo cual no sucede con el cable coaxial ya que el nivel de pérdidas que tiene depende principalmente de la temperatura, por lo que, para climas cálidos se debe reducir la distancia entre ellos. En la Tabla 8-1 se muestra la atenuación del cable coaxial, así como la atenuación de fibras unimodo y multimodo.

TIPO DE CABLE	ATENUACION(dB/Km)	LONGITUD DE ONDA(nm)
COAXIAL	61	(100 MHz)
FIBRA OPTICA MULTIMODO	2.4 a 3.2 1.0 a 1.5	850 1,300
FIBRA OPTICA UNIMODO	0.5 0.25	1,300 1,550

TABLA 8-1 COMPARACION DE LA ATENUACION PARA CABLE COAXIAL Y FIBRA OPTICA

CABLE	VELOCIDAD(Mb/s)	No. CANALES	LONGITUD DE ONDA (nm)
PAR	0.7	10	
PAR	2	30	
PAR	8	120 *	
COAXIAL	34	480	
COAXIAL	120	1920	
FIBRA OPTICA MULTIMODO	2	30	850
FIBRA OPTICA MULTIMODO	8	120	850
FIBRA OPTICA MULTIMODO	34	480	850
FIBRA OPTICA UNIMODO	34	480	1,300
FIBRA OPTICA UNIMODO	140	1920	1,300
FIBRA OPTICA UNIMODO	140	1920	1,500
FIBRA OPTICA UNIMODO	560	7,680	1,300
FIBRA OPTICA UNIMODO	560	7,680	1,500

*UTILIZANDO SISTEMA PCM SOBRE CABLES ESPECIALES

TABLA 8-2 RELACION DE VELOCIDAD DE TRANSMISION CON RESPECTO A CANALES

En el caso de par de cobre las ventajas que presenta sobre la fibra óptica son su bajo costo y fácil instalación, ya que la instalación de la fibra óptica requiere de equipo sofisticado así como de personal especializado.

Para los sistemas de telecomunicación multicanal, las fibras ópticas ofrecen una capacidad de tráfico muy grande en una área muy pequeña de cables. En la Tabla 8-2 se muestra la comparación en capacidad que tiene el par de cobre y el cable coaxial con respecto a las fibras ópticas, para diferentes velocidades de transmisión.

Los sistemas de radio enlace presentan la ventaja de que al utilizar el aire como medio de transmisión, el área de señal radiada es mayor, en contraposición, la atenuación que sufre es muy susceptible a las condiciones ambientales.

Cabe recalcar que aunque el desarrollo de las fibras ópticas es acelerado, no implica necesariamente que los sistemas ópticos sustituyan a otros sistemas de comunicación, sino por el contrario sean parte complementaria de ellos. Por lo que no debemos perder de vista que se cuentan con diversas herramientas a nuestra disposición y su buen manejo conllevará al óptimo diseño de sistemas de comunicación para la plena satisfacción de las necesidades.

C A P I T U L O 9

PERSPECTIVAS DE LAS FIBRAS OPTICAS EN MEXICO

La época actual tiene como característica un acelerado desarrollo de la ciencia y la tecnología, lo que origina que las cosas pasen a ser rápidamente obsoletas y sean sustituidas por las últimas inovaciones tecnológicas. Tal desplazamiento, se da en función de que éstas últimas proporcionen un mejor servicio que las primeras a un costo más reducido, o por lo menos a igual costo.

Siguiendo la tendencia anterior, las fibras ópticas empleadas en sistemas de comunicación proporcionan canales de transmisión de información en forma bastante superior a los medios tradicionalmente empleados, en determinadas aplicaciones. A esto, se debe agregar la tendencia en los costos de la manufactura de la fibra, la cual presenta una perspectiva bastante prometedora debido a su reducción en términos reales.

Por su parte, los otros medios de transmisión tienden, de manera general, a incrementar sus costos. Por ejemplo, el cable de cobre está constituido por materia prima que requiere de gastos

cada vez más altos, debido a su costoso proceso de extracción y a su mermada reserva mundial. Para el caso de las microondas el panorama no es más alentador, ya que en la actualidad se tienen prácticamente saturados los canales de transmisión, además de que existen problemas que no se presentan con las fibras ópticas, tales como la interferencia electromagnética o la posibilidad de interceptación de información confidencial.

Por las razones dadas anteriormente, se prevé que en un futuro no muy lejano las fibras ópticas ocuparán un papel relevante en los sistemas de comunicación, no solo a nivel de los países desarrollados, sino también en nuestro país.

Una muestra de lo anterior es que después del temblor de septiembre de 1985, se consideró que la mejor opción para superar los daños sufridos en la red telefónica metropolitana era precisamente un sistema digital de comunicación basado en fibra óptica. Este hecho estimuló el surgimiento de planes de expansión en compañías que anteriormente se relacionaron de alguna forma con las comunicaciones ópticas, tal es el caso de Condumex, quién en el presente manufactura cables de fibra óptica, así como parte del equipo asociado a ésta.

Concretamente, en el caso de la red telefónica la infraestructura implantada está integrada por cuatro centrales de larga distancia, ubicadas en distintos rumbos del Distrito Federal. El sistema se enlazó mediante fibras ópticas y radios digitales, de tal modo que en el caso de ocurrir una falla en alguna de las centrales, cualquiera de las restantes puede absorber en milési-

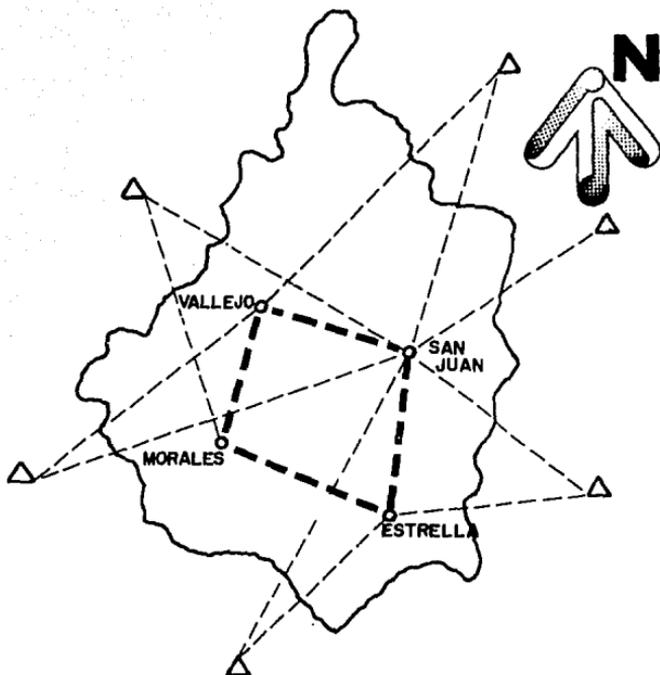
mas de segundo los servicios de la otra. El complejo telefónico puede manejar 20 millones de llamadas mensuales, lo que representa el doble de las llamadas registradas con el sistema anterior.

El sistema está conformado por las siguientes centrales: central Estrella (en el sur del Distrito Federal), Morales (en el poniente), Vallejo (en el norte) y la central telefónica de San Juan (en el centro). La Fig. 9-1 muestra la configuración actual de la red de larga distancia en el área metropolitana.

Los beneficios obtenidos con éste nuevo sistema son: una mayor confiabilidad del servicio de larga distancia, una calidad superior de transmisión, menor congestión en el tráfico telefónico, alta facilidad de operación y mantenimiento, y el uso de bandas de frecuencia compatibles con el sistema de satélites Morelos.

Este sistema cuenta con 20 rutas de fibra óptica, con una longitud total de 154 kilómetros de cable. En cada ruta se tienen 12 fibras de modo único, lo que hace un total de 1 848 kilómetros de fibra. Cada par de fibras maneja 1 920 canales telefónicos, lo que permite una capacidad de 11 520 conversaciones simultáneas a través de una sola ruta; y considerando que se cuenta con 20 rutas, se dispone de una capacidad de 230 420 canales.

Para su operación se utilizaron terminales con fuentes de rayo LASER modulados por señales digitales. Así mismo, se instalaron 52 terminales de equipo multiplex digital de alta frecuencia y 1 700 terminales de baja frecuencia para los sistemas digita-



- CENTRAL
- △ REPETIDOR
- - - MICROONDAS
- - - FIBRA OPTICA

FIG. 9 - I CONFIGURACION ACTUAL DE LA RED DE LARGA DISTANCIA EN EL AREA METROPOLITANA

les de microondas y de fibra óptica.

A corto plazo (planes 87-90) existen dos proyectos de enlace telefónico con fibra óptica para la red metropolitana:

- Una red entre Tezozomoc y las cuatro centrales automáticas de larga distancia actualmente enlazadas con fibra óptica.
- Un enlace entre las centrales locales y las centrales automáticas de larga distancia.

Así mismo, los estudios realizados en circuitos de larga distancia indican que las rutas en las cuales es factible el empleo de fibras ópticas a corto plazo son:

México-Celaya
México-Puebla
México-Cuernavaca
México-Toluca

A largo plazo, aún no están definidos todos los enlaces que se cubrirán con la tecnología óptica en la red metropolitana, pero sí es seguro que se aplicará la fibra óptica en la red troncal PCM. En la Fig. 9-2 se muestra el crecimiento pronosticado hasta 1988 de la red PCM en la República Mexicana.

Como se mencionó anteriormente, una de las empresas mexicanas que ha estado presente en la manufactura de cables de fibras ópticas es ConduMex. Este grupo efectuó en 1974 sus primeros estudios

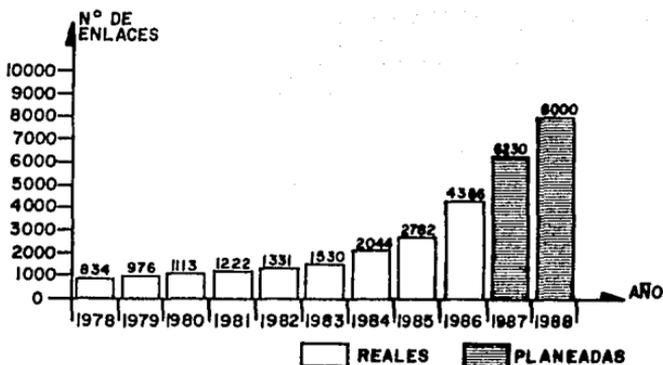


FIG. 9-2 EVOLUCION DE LA RED PCM EN LA REPUBLICA MEXICANA

referentes a las aplicaciones de la fibra óptica en el área de telefonía. Ese mismo año los fabricantes de equipo optoelectrónico lanzaron al mercado los primeros modelos comerciales de equipo de transmisión y recepción de pulsos lumínicos modulados por señales digitales. En 1978 teléfonos de México comenzó a mostrar interés en cuanto a las posibilidades de las fibras ópticas en las telecomunicaciones, por lo cual en 1979 ConduMex expuso a TELMEX la posibilidad de hacer un enlace por fibra óptica entre dos centrales; ésta propuesta fue aceptada en 1981, año en el que se creó un departamento de investigación y desarrollo en el campo de las fibras ópticas dentro del grupo ConduMex. Ese mis-

mo año se iniciaron los preparativos, tanto para la capacitación de personal como en la adquisición de equipo de prueba, con el objeto de realizar una instalación piloto entre las centrales telefónicas de Victoria y Peralvillo (con una longitud de 6 Km), como parte de un enlace de 40 Km de longitud. Parte del enlace estuvo a cargo de Condumex y entró en operación en 1982 con tráfico real de líneas telefónicas. Actualmente ésta empresa ofrece paquetes denominados " SITROP " (Sistemas de Transmisión Óptica), los cuales incluyen: equipos terminales, cable, empalmes, instalación, asesoría y capacitación.

Existen en México otras empresas interesadas en hacer uso de las ventajas que representa el empleo de las fibras ópticas. Tal es el caso de Bancomer y Banamex, quienes tienen el proyecto de enlazar algunas sucursales con su casa matriz, agilizando de esta manera la comunicación entre ellas y por consiguiente mejorando el servicio al cuentahabiente. Por otra parte, Televisa tiene actualmente en estudio la posibilidad de utilizar la fibra en el servicio de cablevisión. Otras instituciones que realizan estudios sobre el tema son el Instituto de Investigaciones Eléctricas y el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

C A P I T U L O 1 0

M O D E L O D E U N S I S T E M A O P T I C O D E C O M U N I C A C I O N

Como proyecto complementario a la parte teórica en ésta tesis se buscó desarrollar un modelo de un sistema óptico de telecomunicación, el cual debía incluir un transmisor, un repetidor y un receptor. Al elaborar éste modelo se tuvo como objetivo el que pudiera simular el comportamiento de un sistema real de transmisión de datos por fibra óptica, por lo que podría ser fácilmente utilizado para ilustrar la operación de tal sistema. Una aplicación para éste modelo podría ser entonces la de propósitos educativos.

Las características con que cuenta el modelo hecho son:

- Disponibilidad de componentes en el mercado nacional.
- Costo relativamente bajo.
- Versatilidad en cuanto a la capacidad para asumir distintas condiciones de operación en un sistema óptico de telecomunicación.

- Sencillez en su construcción.
- Sencillez en su operación.
- Sencillez en su mantenimiento.

A continuación se describirá el funcionamiento de los distintos elementos que componen al modelo.

TRANSMISOR

El transmisor está compuesto básicamente por tres etapas: una etapa amplificadora de la señal de información, otra etapa de modulación y finalmente un excitador para LED infrarrojo el cual queda controlado por la señal modulada (Fig. 10-1).

El transmisor se diseñó para manejar una señal de audio analógica. Esta señal proviene de un micrófono, por lo que para poder ser manipulada adecuadamente requiere de amplificación previa. Para realizar éste proceso se utilizó un amplificador operacional, a continuación, la señal es utilizada en la etapa moduladora.

Para la etapa moduladora, se seleccionó una modulación de impulsos, ya que por medio de ésta, se puede evitar la no linealidad del LED, pues en éstas condiciones, el LED se limita únicamente a switchear de un estado de encendido a otro de apagado.

Existen distintos tipos de modulación por pulsos, éstos son: modulación por amplitud de pulsos (PAM), modulación por duración

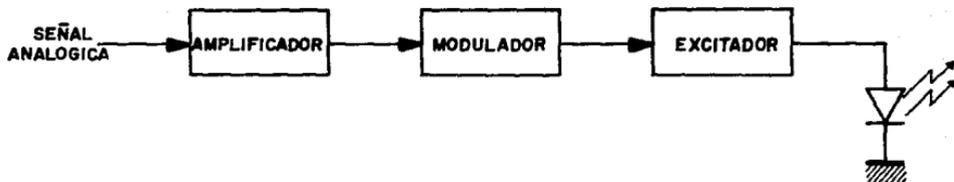


FIG. 10-1 DIAGRAMA A BLOQUES DEL TRANSMISOR

de pulsos (PDM), modulación por posición de pulsos (PPM), modulación por frecuencia de pulsos (PFM), etc.. La modulación por amplitud de pulsos fue descartada ya que la no linealidad del LED podía causar distorsión. De los tipos de modulación restantes se seleccionó la de frecuencia de pulsos pues los circuitos involucrados en la modulación y demodulación resultaron ser los más sencillos y sus componentes fácilmente disponibles en el mercado nacional (se usaron los circuitos, para modulación y de modulación, recomendados por el fabricante en el manual de Nacional).

La modulación por frecuencia de pulsos se hizo con un timer 555 configurado como oscilador astable. (Fig. 10-2).

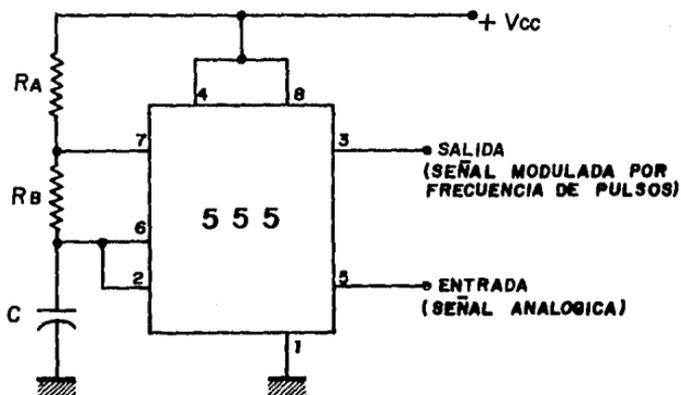


FIG. 10-2 MODULADOR POR FRECUENCIA DE PULSOS

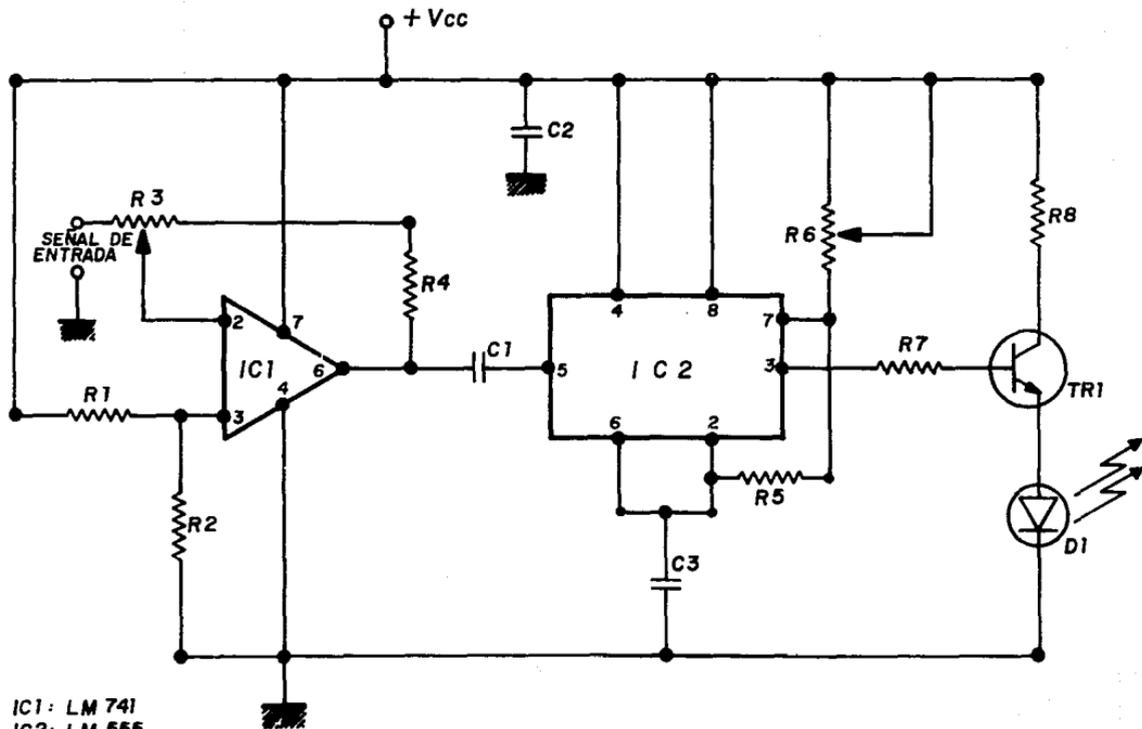


FIG. 10-3 TRANSMISOR

Una vez modulada la señal es necesario usarla para polarizar al LED pero la corriente suministrada por el timer es insuficiente, por lo que hubo necesidad de utilizar un buffer constituido por un transistor configurado como seguidor emisor, a fin de que fuera éste el encargado de manejar la corriente del LED (Fig. 10-3).

RECEPTOR

El receptor (Fig. 10-4) está formado por tres etapas: la primera etapa la constituye propiamente el detector de la señal luminosa, la segunda etapa es un amplificador y la tercera etapa corresponde al demodulador de frecuencia de pulsos. Se tiene una etapa adicional encargada de realizar una amplificación para audio.

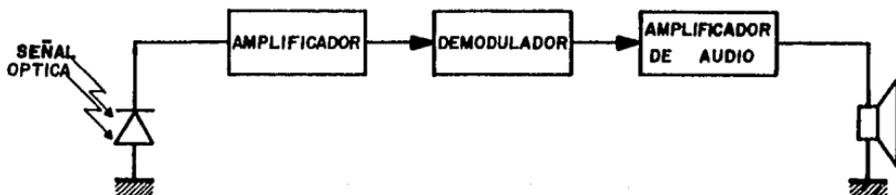


FIG. 10-4 DIAGRAMA A BLOQUES DEL RECEPTOR

Como detector se eligió a un diodo PIN. El criterio para ha-

cer ésta selección fue que era el único fotodetector que se pudo encontrar en el mercado. En realidad cualquier detector hubiera sido útil pues la frecuencia que se dió a la portadora (40.6 KHz) en la modulación por frecuencia de pulsos es fácilmente manejable por cualquier tipo de fotodetector.

El tren de pulsos modulado en frecuencia puede ser demodulado igual que una señal de FM ya que la frecuencia fundamental, en éste caso, es exactamente igual a la señal en FM. La forma más sencilla de realizar la demodulación en FM es por medio de un PLL (circuito de sincronización de fase).

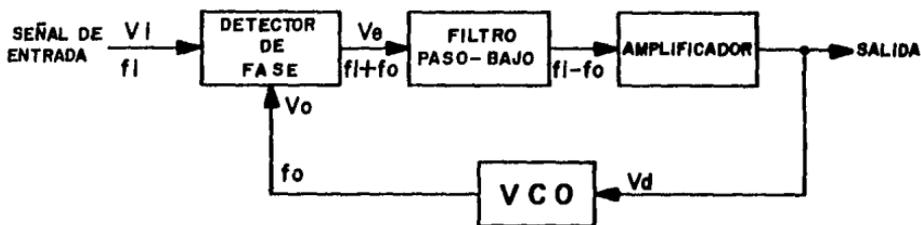


FIG. 10 -5 DIAGRAMA A BLOQUES DE UN PLL

En forma simplificada el funcionamiento de un PLL (Fig. 10-5) es como sigue: se introduce a un detector de fase, en forma simultánea, la señal en FM y la salida de un VCO; éste detector produce una señal compuesta por la suma y diferencia de frecuencias de la señal de entrada al PLL y la salida del VCO; la señal se hace pasar posteriormente por un filtro pasobajas del cual se obtiene una señal proporcional a la diferencia de frecuencias.

Esta es amplificada con una ganancia adecuada y sirve para alimentar al VCO. De ésta forma se crea un lazo de realimentación a través del VCO, de modo que la salida de éste intenta oscilar con una frecuencia que es igual a la correspondiente a la señal de entrada, por lo que la entrada del VCO debe seguir las variaciones de la frecuencia en la señal de entrada al PLL, ésto es, debe ser igual a la señal demodulada.

El PLL se puede implementar en forma discreta, sin embargo se decidió utilizar un circuito integrado el cual contiene los principales componentes del PLL. Este circuito fue el LM 565 (Fig. 10-6).

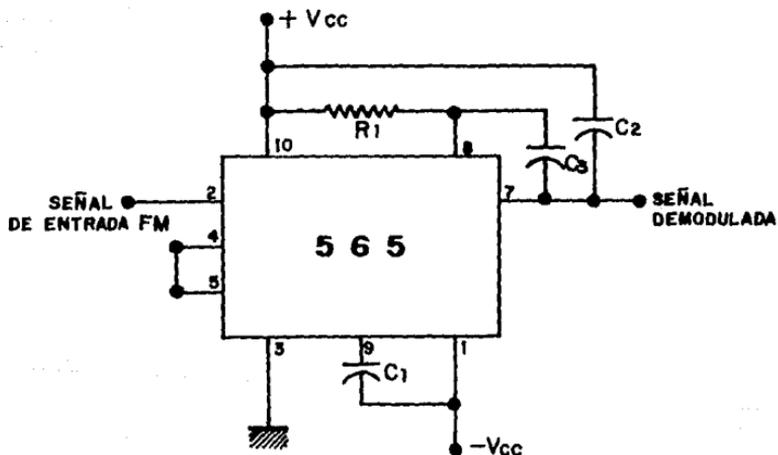
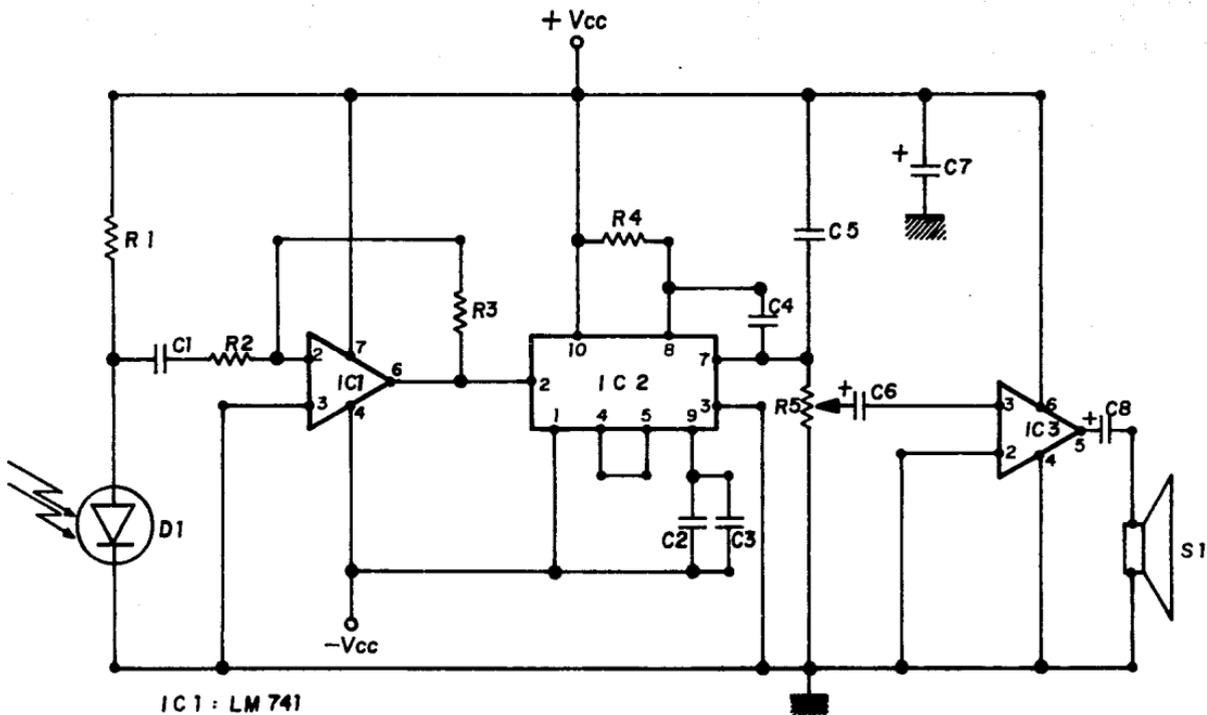


FIG.10-6 DEMODULADOR F M



IC1 : LM 741
 IC2 : LM 565
 IC3 : LM 386

FIG. 10-7 RECEPTOR

La salida del 565 sirve como entrada a un amplificador de audio constituido por un circuito integrado LM 386 (Fig. 10-7). Este circuito es recomendado por su fabricante para audio-frecuencias y fue elegido por la calidad de su sonido y facilidad de montaje.

REPETIDOR

El repetidor (Fig. 10-8) está constituido por una etapa de detección, una etapa amplificadora y un excitador para LED infrarrojo.

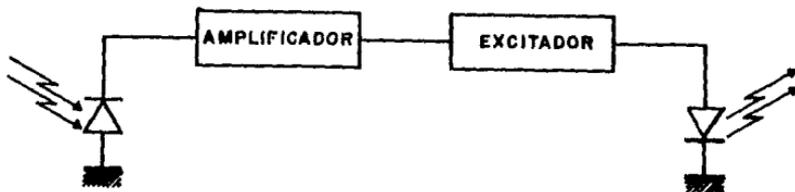


FIG. 10 - 8 DIAGRAMA A BLOQUES DEL REPETIDOR

El amplificador nuevamente está hecho con un operacional configurado como amplificador inversor. El excitador es un transistor conectado como seguidor emisor y que conmuta de corte a saturación siguiendo la salida del amplificador. El diagrama esquemático del repetidor se muestra en la Fig. 10-9.

En la práctica el uso de los repetidores es escaso, ya que gracias a los avances tecnológicos se ha logrado que la atenua-

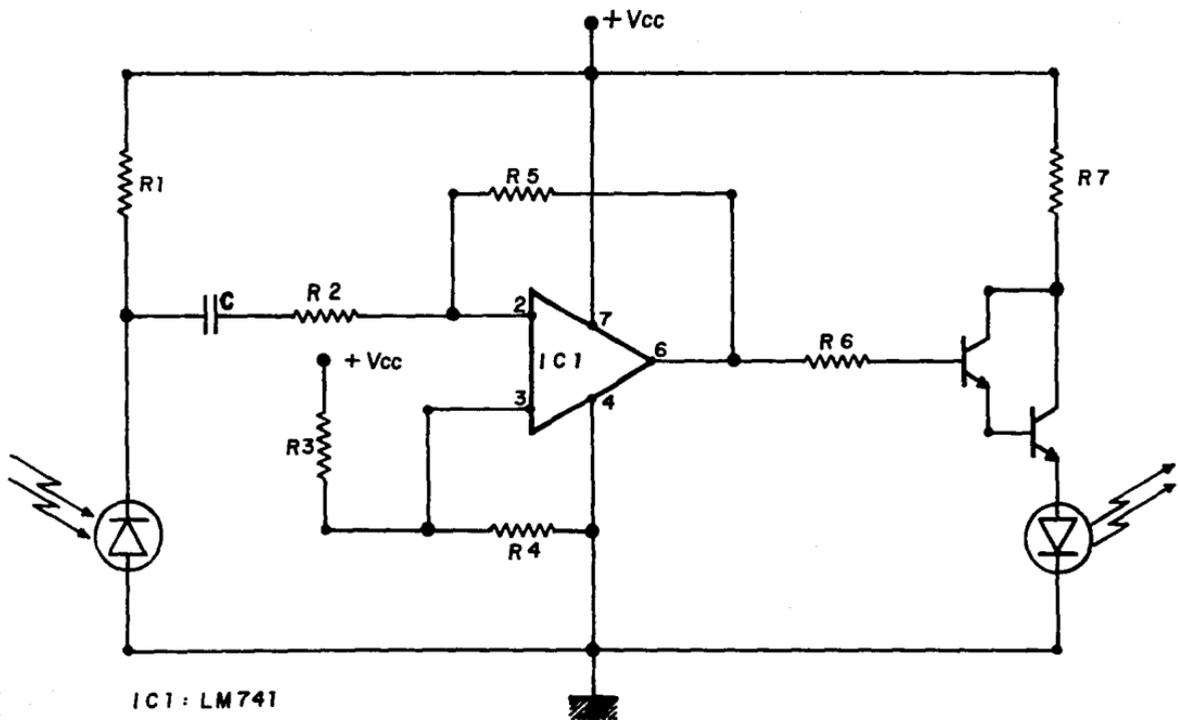


FIG. 10 - 9 REPETIDOR

ción en la fibra sea tan pequeña que solo distancias del orden de decenas de kilómetros hagan necesaria la utilización de éstos.

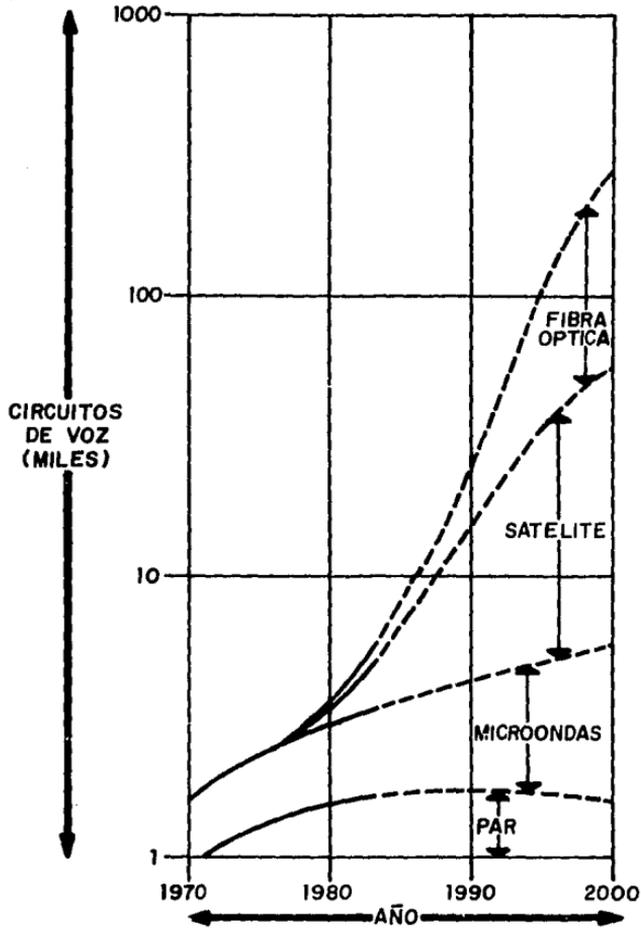
MEDIO DE TRANSMISION

Se decidió usar como sustituto del cable de fibra óptica varilla de acrílico, ya que por medio de ésta se puede simular un canal de transmisión igual al proporcionado por un cable multimodo, utilizandose como transmisor un LED infrarrojo común. Esto es porque el diámetro de la varilla de acrílico compensa la apertura numérica de un LED de bajo costo.

CONCLUSIONES

A lo largo de ésta tesis se han expuesto los fundamentos necesarios para comprender lo que es un sistema óptico de comunicaciones. Se pudo ver como las fibras ópticas presentan bastantes ventajas sobre los medios tradicionales de comunicación; entre otras tenemos: gran ancho de banda, atenuación pequeña, inmunes a interferencias electromagnéticas, la información puede ser transmitida con una confiabilidad casi absoluta. Cabe mencionar que los costos de su fabricación tienden a disminuir, como se muestra en la figura de costo calculado de un suscriptor para un enlace de 1 Km, utilizando una sola fibra óptica.

Conceptualmente, los sistemas por fibra óptica son bastante similares a los otros sistemas de comunicación. Es por ello posible, en algunos casos, utilizar la infraestructura implementada para un medio de comunicación estandar, como en el caso del par de cobre, para establecer un sistema óptico de comunicación (por ejemplo los canales para cable de cobre pueden también ser usados por fibra óptica). Es por ésto que la creación de un sistema óptico de comunicación, a partir de otro distinto, sea una tarea relativamente sencilla.

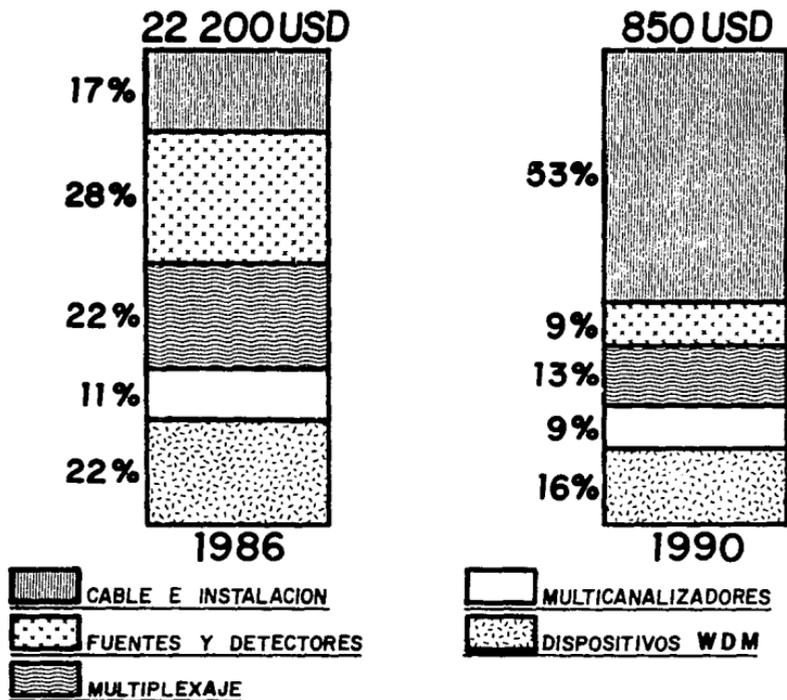


TENDENCIA DE LOS MEDIOS DE TRANSMISION

La tecnología de las fibras ópticas ha evolucionado rápidamente. Su producción, en la actualidad, involucra una gran industria que necesita de la participación de personal altamente calificado, proporciona empleo a miles de personas en distintas partes del mundo y sus perspectivas de crecimiento son bastante grandes (ver figura de tendencia de los medios de transmisión). El mercado más importante para ésta industria se encuentra en las telecomunicaciones, donde de acuerdo con las investigaciones que se realizan, la fibra óptica tiene capacidades potenciales, que actualmente no son explotadas debido a limitaciones tecnológicas. Dado que los sistemas de cable coaxial y microondas son sistemas considerados maduros, es prácticamente imposible que por algún avance técnico se mejoren sustancialmente sus características.

Es un hecho que el campo de aplicación de las fibras ópticas está casi sin explotar y que conforme se perfeccione su tecnología el uso de éstas irá aumentando, no solo en lo referente a comunicaciones, sino que también cubrirá algunas de las necesidades de otras áreas, por ejemplo, en medicina se aplica para observar el estado en que se encuentran distintos órganos humanos, mediante la introducción de una fibra óptica la cual lleva la imagen del órgano al observador.

Ante todo lo mencionado anteriormente cabe preguntarse, ¿Por qué el uso que actualmente se da a las fibras ópticas no es mayor?. Las causas son diversas, tal vez una de las principales es que se tienen realizadas cuantiosas inversiones en los sistemas



COSTO CALCULADO DE UN SUSCRITOR PARA UN ENLACE DE 1 Km, UTILIZANDO UNA SOLA FIBRA OPTICA

convencionales, por lo que la introducción de nuevas tecnologías sea difícil, de ahí que la entrada de la fibra óptica en el mercado de las telecomunicaciones sea más lenta de lo que la tecnología permite.

En el caso de México se tienen proyectos bastante ambiciosos para la utilización de sistemas ópticos de telecomunicación. La destrucción de algunos troncaleros telefónicos durante los temblores de Septiembre de 1985, permitió que se acelerara la implementación de las fibras ópticas. Desgraciadamente la crisis económica actual ha limitado éste proceso.

Uno de los aspectos cruciales para que un país aspire a elevar su nivel de vida, es el de contar con un buen sistema de telecomunicaciones. El camino de las fibras ópticas en México está poco explorado y falta mucho por hacer. El rezago tecnológico que México siga manteniendo, respecto a los países industrializados, dependerá del esfuerzo que se haga para crear e introducir nuevas tecnologías. Es evidente que nuestro país cuenta con los recursos humanos y materiales para realizar ambas cosas y que bastará una adecuada administración de éstos recursos para poder hacerlo exitosamente.

A P E N D I C E "A"

O P T I C A

Al realizar el estudio de las fibras ópticas como canales en los que se transmite información por medio de luz, es útil conocer el comportamiento de ésta al viajar a través de la fibra. El objetivo de éste apéndice es dar los conocimientos básicos de Óptica, necesarios para comprender la transmisión de luz en un sistema de comunicación basado en fibras ópticas.

La Optica es la parte de la Física que estudia las leyes y los fenómenos de la luz. Entendiendose por luz, la banda del espectro electromagnético que además de incluir a la luz visible, incluye las zonas ultravioleta e infrarroja:

ZONAS OPTICAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	LEJANO INFRAROJO.....	14 μ m a 100 μ m
	INTERMEDIO INFRAROJO...	4 μ m a 14 μ m
	CERCANO INFRAROJO....	760 nm a 4000 nm
	LUZ VISIBLE	380 nm a 760 nm
	CERCANO ULTRAVIOLETA..	300 nm a 380 nm
	LEJANO ULTRAVIOLETA ...	200 nm a 300 nm
	EXTREMO ULTRAVIOLETA ..	1 nm a 100 nm

Al estudiar la luz se pueden tomar dos puntos de vista: en el primero se puede considerar a la luz como un fenómeno ondulatorio, en el segundo considerarla como el flujo de partículas especiales, las cuales tienen determinada energía asociada a ellas llamadas fotones o cuantos de luz. El enfoque que se tome dependerá del fenómeno que se esté estudiando.

Bajo determinadas circunstancias, la luz presenta los efectos de interferencia, difracción y polarización, estos efectos están unívocamente asociados a las ondas transversales, sin embargo existen fenómenos como el efecto fotoeléctrico, la radiación del cuerpo negro, etc., que solo pueden ser explicados suponiendo la existencia de los fotones.

El estudio de la propagación, reflexión y refracción de la

luz se apoya en gran parte en las propiedades ondulatorias de esta. Para sistemas cuyas dimensiones son grandes en comparación con la longitud de onda de la luz, no se manifiesta en forma obvia su naturaleza ondulatoria. En este caso se puede concebir a la luz como rayos que viajan en línea recta a través de un medio y se desvian, debido a la interacción de superficies reflejantes y refractantes de acuerdo con las leyes geométricas simples.

A la parte de la optica que describe las características geométricas de los rayos de luz en un sistema cuyas dimensiones exceden por mucho la longitud de onda de la luz, se le conoce como Optica Geométrica. Al campo de la optica en el que se estudian fenómenos para los cuales son significativas las relaciones de amplitud y fase de los rayos luminosos, se le llama Optica Ondulatoria. Si se estudia el comportamiento de los cuantos o fotones, entonces se está en el campo de la óptica cuántica.

Para el estudio de los sistemas ópticos de telecomunicación es necesario abarcar los tres campos de optica antes mencionados, lo cual se hará a lo largo de este apéndice dando mayor énfasis a la Optica Geométrica, pues, por medio de ésta, se puede explicar la mayor parte de los fenómenos de nuestro tema de estudio.

Las ondas de luz, son ondas electromagnéticas de alta frecuencia, de modo que los vectores eléctrico y magnético variantes, son ortogonales entre sí. Al ser ondas electromagnéticas deben cumplir con las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

donde \vec{E} y \vec{H} son las intensidades de campo eléctrico y magnético respectivamente, \vec{D} y \vec{B} son las densidades de flujo eléctrico y magnético respectivamente, \vec{j} es la densidad de corriente y ρ es la densidad volumétrica de carga. Junto con las ecuaciones de Maxwell es importante considerar las relaciones constitutivas del medio:

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

donde ϵ_r es la permitividad relativa, ϵ_0 es la permitividad del vacío, μ_r es la permeabilidad relativa, μ_0 es la permeabilidad del vacío y σ la conductividad del medio.

Las ecuaciones de Maxwell constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que relacionan campos vectoriales entre sí. La solución de este sistema está determinada por las condiciones de frontera del medio en que se encuentran los campos. Si se considera un medio dieléctrico, isotrópico y libre de

carga se cumplirá con $\rho = 0$, $\vec{j} = 0$, $\mu_r = 0$. En este caso de las ecuaciones de Maxwell se puede derivar la ecuación de onda aplicada tanto a un campo eléctrico, como a un campo magnético:

$$\nabla^2 E - \mu_0 \epsilon \partial^2 E / \partial t^2 = 0$$

$$\nabla^2 H - \mu_0 \epsilon \partial^2 H / \partial t^2 = 0$$

La solución de la ecuación de onda está dada por cualquier función de la forma:

$$\psi = f(t \pm 1/v \hat{n} \cdot \vec{r})$$

Esta función físicamente representa a una onda plana que se propaga con una velocidad en la dirección \hat{n} o en la dirección $-\hat{n}$, \vec{r} , es un vector dado por las coordenadas del punto desde el cual se observa la onda.

Una consideración mediante la cual se simplifica el estudio de las ondas electromagnéticas, es suponer que estas son senoides en función del tiempo. Los demás casos quedan comprendidos en el estudio, representando las ondas correspondientes por medio de series de Fourier y suponiendo un medio lineal. Haciendo la anterior consideración, una solución particular para las ecuaciones de onda de los campos eléctrico y magnético, estaría dado por una onda electromagnética plana que se propague en la dirección positiva Z, con el vector \vec{E} variando sobre el plano YZ y el vector \vec{H} variando sobre el plano XZ con las magnitudes

de \vec{E} y \vec{H} dadas por:

$$|\vec{E}| = E_0 \cos (KZ - \omega t)$$

$$|\vec{H}| = H_0 \cos (KZ - \omega t)$$

En la Fig. A-1 se muestra la forma de la onda electromagnética dada por las ecuaciones anteriores.

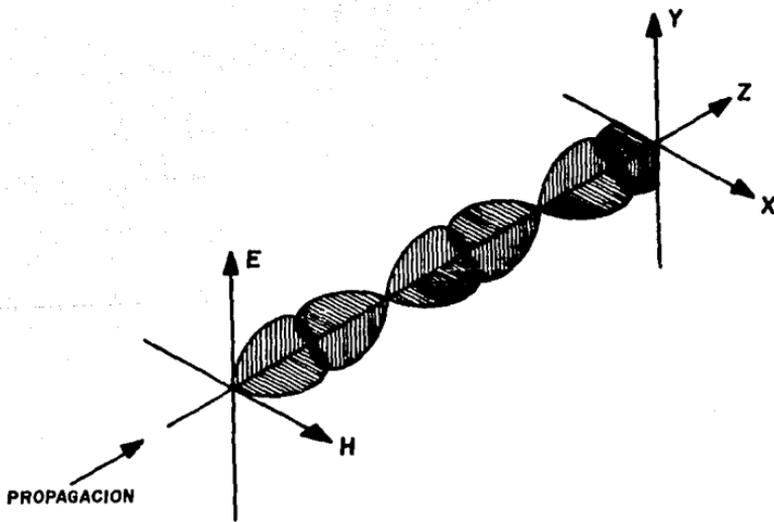


FIG. A-1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS

La energía transportada por una onda de este tipo está dada por el vector de Poynting \vec{S} :

$$\vec{S} = 1/\mu_0 (\vec{E} \times \vec{B})$$

El vector \vec{S} tiene la dirección en la que es transportada la energía, su magnitud está dada por la energía transportada en esa dirección por área unitaria y por unidad de tiempo. Para la anterior onda electromagnética la energía promedio transportada está dada por:

$$\vec{S}_{med} = E_0 B_0 / 2\mu_0 = E_0 / 2c\mu_0 \quad (W/m^2)$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

Al valor de la magnitud media de la energía se le conoce como intensidad de la radiación electromagnética. Para el caso de la luz, es la intensidad luminosa y tiene dimensiones de W/m^2 .

Un frente de onda se define como el lugar geométrico de todos los puntos que en un tren de ondas tienen la misma fase, también se les conoce como superficies de fase constante. Fig. A-2.

Para una fuente puntual de luz, los frentes de onda son superficies esféricas concéntricas a la fuente, de modo que la luz emitida es radiada en todas direcciones, teniendo su trayectoria ortogonal al frente de onda. En este caso los valores de E_0 y H_0 correspondientes a la amplitud del campo eléctrico y magnético en un punto dado, varían de acuerdo con la distancia a la fuente de forma tal que, la intensidad luminosa en cual-

quier punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el punto y la fuente:

$$\bar{s}_2/\bar{s}_1 = r_1^2/r_2^2$$

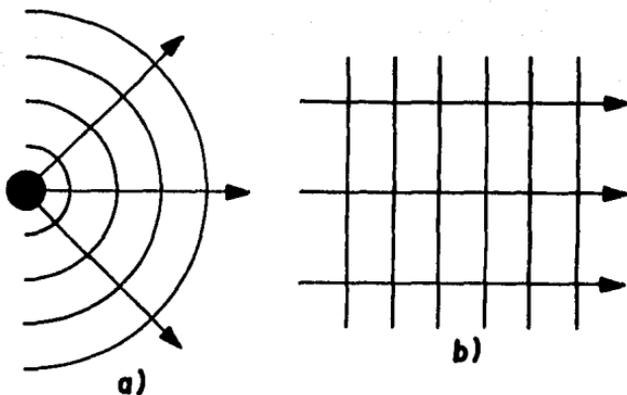


FIG. A-2 FRENTES DE ONDA
a) ESFERICOS
b) PLANOS

El vector de propagación \hat{k} es un vector unitario normal a \bar{E}

y \vec{H} , que apunta en la dirección de transmisión de energía a medida que se propaga el frente de onda. Tiene además la característica de apuntar siempre en la misma dirección en tanto el frente de onda viaje por un medio uniforme. Esto último significa que la luz siempre viaja en línea recta a través de los medios uniformes. A la recta sobre la cual se mueve el vector de propagación \hat{k} se le conoce como rayo de luz. Es importante hacer notar que los rayos de luz siempre son normales a los frentes de onda.

Los rayos de luz sufren desviaciones en su trayectoria por tres causas basicamente: por reflexión en una superficie reflectante, refracción, la cual se produce cuando el rayo luz entra o sale de un medio transparente denso, y por último difracción, la cual ocurre cuando la luz encuentra obstáculos o aberturas con una dimensión del orden de su longitud de onda.

La luz tiene una longitud de onda bastante pequeña si se compara con los sistemas macroscópicos ordinarios, por lo tanto a menos que estén presentes obstáculos con las dimensiones adecuadas se podrá despreciar el efecto de la difracción. En la Óptica Geométrica se considera que los rayos de luz cumplen con las premisas anteriores.

-Definiciones y leyes básicas de la Óptica Geométrica.

Un parámetro óptico fundamental en un material, es el índice

de refracción o refractivo el cual está definido de acuerdo con la siguiente relación:

$$n = (\epsilon_r)^{1/2}$$

donde ϵ_r es la permitividad relativa del medio.

En la tabla siguiente se muestran valores típicos de n para diferentes medios.

Aire-----	1.00
Diamante-----	2.42
Agua-----	1.33
Vidrio-----	1.5
Topacio-----	1.63

Los conceptos de reflexión y refracción, pueden ser mas fácilmente interpretados considerando el comportamiento de rayos de luz asociados con frentes de onda planos viajando en un material dieléctrico. Cuando un rayo de luz encuentra el límite de separación de 2 diferentes medios (interface), parte del rayo es reflejado hacia el interior del primer medio y el resto es refractado hacia el segundo material (Fig. A-3 y A-4).

ciudad $c = 3 \times 10^8$ m/s. Al entrar en un dieléctrico o medio no conductor la onda viaja con una velocidad v , la cual es característica del material y menor que c . La relación de la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad en un material dado, está determinada por el índice de refracción esto es:

$$n = c/v$$

Desde el punto de vista de la Óptica Geométrica para realizar el estudio de los fenómenos de reflexión son necesarios los conocimientos de las siguientes leyes:

-Primera Ley de la Reflexión.

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie reflectora (interface) están contenidos en un plano común.

-Segunda Ley de la Reflexión.

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

-Primera Ley de Refracción.

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie están en un mismo plano.

-Segunda Ley de la Refracción (Ley de Snell)

Esta primera ley se rige por la siguiente expresión:

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

Para una comprensión física de las leyes antes mencionadas ver la Fig. A-3.

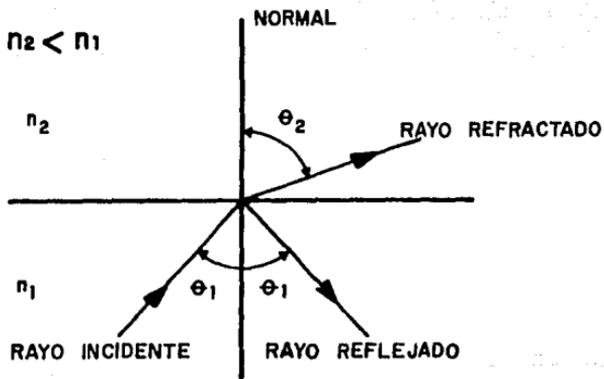


FIG. A - 3

Cuando los rayos de luz viajan a través de un medio con un índice de refracción dado (n_1) e inciden en la interface con otro medio de índice de refracción menor (n_2), entonces son reflejados y se dice que sufren una reflexión interna.

Si el ángulo de incidencia aumenta y se tienen presentes las condiciones para una reflexión interna, el ángulo de refracción tiende a 90° . En el momento en que el ángulo de refracción es de 90° (es decir, el rayo refractado es paralelo a la interface), al valor que toma θ_1 se le conoce como ángulo crítico de incidencia y se denota por θ_c . Fig. A-4.

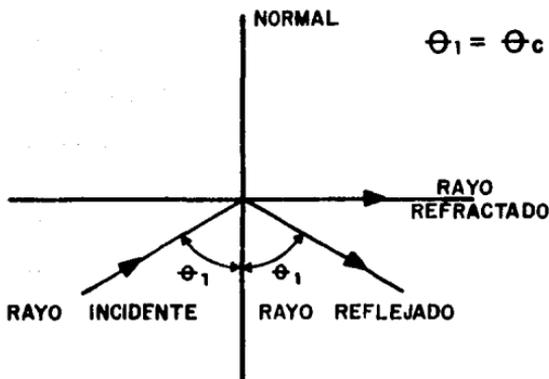


FIG. A-4 ANGULO CRITICO

Cuando el ángulo de incidencia θ_1 es menor que el ángulo crítico, y se tienen las condiciones para una reflexión interna ($n_1 < n_2$), la luz es totalmente reflejada y entonces se dice que tiene una reflexión interna total. Esta es una situación ideal ya que en la práctica existen pérdidas por absorción al realizarse la reflexión. Fig. A-5.

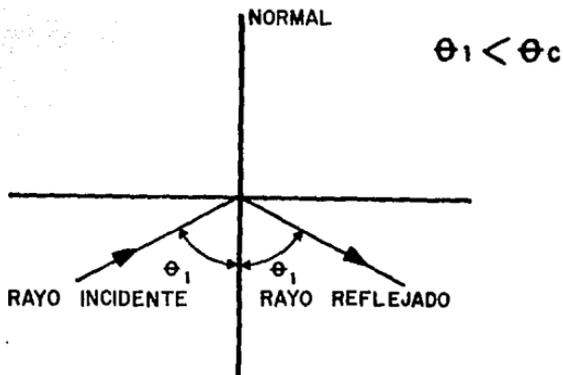


FIG. A-5 REFLEXION INTERNA TOTAL

Por medio de la reflexión interna total se pueden conducir haces de luz a través de una guía de material transparente, con

un índice de refracción mayor al del medio que lo rodea. Este fenómeno se aplica en la conducción de luz en una fibra óptica, y de hecho es la base para ello. Fig. A-6.



FIG. A-6 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA FIBRA OPTICA

Cuando un rayo de luz pasa de un medio con un índice de refracción n_1 a otro medio con un índice de refracción n_2 entonces se define el índice de refracción relativo por la siguiente fórmula:

$$n_r = n_2/n_1$$

Al llegar el rayo del medio 1 al medio 2, parte de la energía que se transporta es transmitida al medio 2 y la parte restante es reflejada hacia el medio 1. A la refracción de la energía que es reflejada se le conoce como coeficiente de reflexión R , de igual forma a la fracción transmitida se le conoce como coeficiente de transmisión. El valor que tomen los anteriores coeficientes depende del índice de refracción relativo y está dado por las siguientes fórmulas:

$$R = (n_r - 1/n_r + 1)^2$$

$$T = 4n_r/n_r + 1)^2$$

donde R es el coeficiente de reflexión y T el coeficiente de transmisión, se puede deducir de las fórmulas anteriores que $R + T = 1$.

Debido a la refracción de la luz se presenta el fenómeno de la dispersión cromática. Este ocurre debido a que el valor del índice de refracción varía al cambiar la longitud de onda. Esto ocasiona a su vez, que la luz compuesta por distintos colores se refracte con ángulos distintos en una interface refractora. Este fenómeno es indeseable en las telecomunicaciones ópticas y se evita utilizando luz monocromática.

Al transmitir luz por un medio, la intensidad que se reciba dependerá diversos factores, tales como la longitud de onda de la luz y la distancia a la cual se transmita.

Los fenómenos que ocasionan pérdidas de energía dentro del

medio en que transmita la luz son la absorción y la dispersión. Si se considera exclusivamente el fenómeno de absorción, la intensidad del rayo disminuye exponencialmente con la distancia. De igual forma, la dispersión ocasiona una disminución, también exponencial en la intensidad. La ecuación general para la atenuación está dada por:

$$\phi = \phi_0 e^{-\mu x}$$

donde x es la distancia y μ el coeficiente de atenuación.

Cuando se genera la luz ocurren transiciones entre los niveles energéticos en los electrones de los átomos, de modo que cuando un electrón pasa de un nivel de excitación con alta energía a un nivel de menor energía, aparece un fotón o cuanto de luz, con una frecuencia proporcional a la diferencia de energía entre los niveles energéticos. Esta relación está dada por la ecuación de Planck:

$$Q = h\nu$$

donde Q es la energía del fotón en Joules, h la constante de Planck (6.6×10^{-34} Joules-segundo) y ν la frecuencia en Hz.

La naturaleza corpuscular de la radiación electromagnética domina sobre el comportamiento ondulatorio para frecuencias bastante altas (rayos X, gama, etc...).

APENDICE "B"

REDES DE SERVICIOS INTEGRADOS CON FIBRA OPTICA

El ancho de banda disponible en las fibras ópticas, permite a los abonados en una red de servicios integrados disponer de servicios tales como telefonía, facsímil, datos, TV, sonido estéreo, videoteléfono, etc. , los cuales no podrían ser proporcionados por medios convencionales tales como el par telefónico, o el cable coaxial.

Con el avance que hasta la actualidad ha registrado la tecnología de la fibra óptica, es económicamente factible conectar a un abonado con una red de servicios integrados utilizando como enlace una fibra óptica. La tecnología que se utilice en la red dependerá del número de abonados, de la ubicación de éstos y del servicio suministrado. Las arquitecturas tradicionalmente empleadas son: la red en anillo, la red en árbol y la red en estrella, existe además la red en malla, sin embargo no será considerada en éste estudio ya que su eficiencia al aplicarse en una línea

es muy baja.

En la red de anillo se tienen a todos los abonados conectados a una línea común, de tal manera que cualquier información introducida a la red pasa por todos los nodos. En éste tipo de red el canal de transmisión debe contar con un gran ancho de banda dado que solo se dispone de un único canal para todos los abonados. Por éste hecho, podría parecer que la fibra óptica tendría una gran aplicación en éste tipo de arquitectura, sin embargo ésta red tiene la desventaja de que una falla en las terminales de abonado, o una ruptura, la ponen fuera de servicio.

La red de árbol está formada por ramas, las cuales, en el caso de una red bidireccional, son trayectorias con sentidos opuestos de transmisión. De éste modo cada abonado queda conectado a dos canales: uno para la transmisión de datos y el otro para su recepción. Este tipo de red es usado cuando se debe transmitir información desde una fuente central a varios abonados, como en el caso de la televisión por cable.

Para la red en estrella cada abonado se conecta a la central por medio de una línea individual. Los canales de comunicación pueden tener anchos de banda relativamente bajos, ya que el ancho necesario queda limitado por las necesidades del usuario.

Los parámetros de confiabilidad y disponibilidad, en éste caso, están determinados por la capacidad del centro de conmutación.

Los estudios realizados hasta el momento indican que el tipo de red más adecuado para ser utilizado en los servicios integra-

dos es la red en estrella, ya que tiene la ventaja de que el equipo de abonado es menos complejo y más barato que el requerido en los otros tipos de redes. Se abate además el costo de la infraestructura para la red de estrella, ya que éste tipo de red es precisamente la más usada en telefonía y los ductos empleados por ésta, pueden ser aprovechados para la fibra óptica.

La figura B-1 muestra la configuración de las diferentes redes para abonado, mencionadas anteriormente.

Es deseable que una red local basada en fibras ópticas cumpla con las siguientes características:

- Posibilidad de usar en el futuro distintas longitudes de onda.
- Compatibilidad con las redes actuales.
- Compatibilidad con el equipo de abonado.
- Posibilidad de proporcionar servicio mínimo en caso de interrupción de energía eléctrica (por ejemplo, asegurar el servicio telefónico).
- La calidad de la señal recibida debe mejorar, en comparación con los sistemas tradicionalmente usados.

Para cumplir con los anteriores requerimientos existen distintas formas de realizar la transmisión y el multiplexaje de las señales. Las características actuales de los sistemas de transmisión y las propiedades intrínsecas de la fibra, parecen indicar que la forma más óptima de realizar la transmisión es por medio

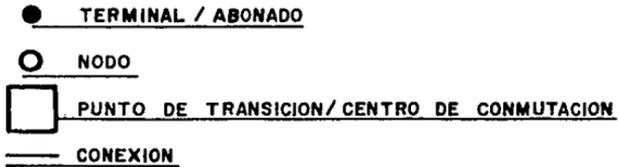
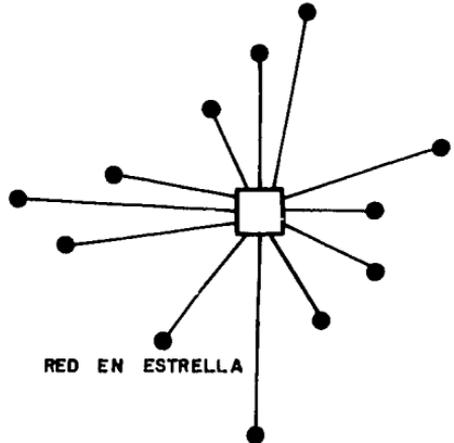
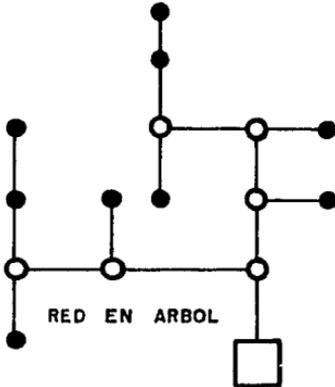
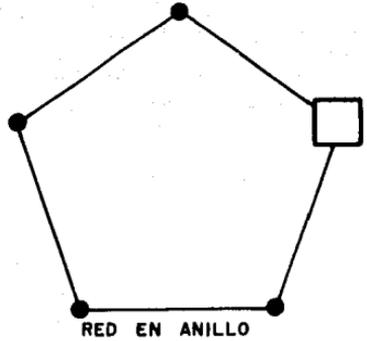
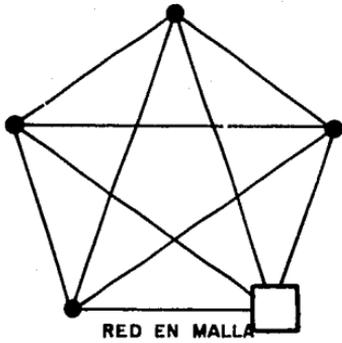


FIG. B-1 ARQUITECTURAS UTILIZADAS EN REDES LOCALES

de señales digitales y utilizando la técnica de multiplexaje WDM (multiplexaje por división en la longitud de onda).

La red de servicios integrados con fibra óptica deberá proporcionar los servicios actualmente existentes, así como otros que se necesitarán en el futuro, tales como:

- Servicio de telefonía, datos, textos, facsímil, etc..
- Servicios de televisión por cable, programas de TV y sonido estéreo.
- Nuevos servicios de ancho de banda amplio y estrecho, tales como el videoteléfono.

Cada uno de los servicios proporcionados en una red de servicios integrados, requiere de una velocidad mínima de transmisión. Dicha velocidad puede variar desde 1.3 Mbit/seg, la cual es suficiente para transmitir sonido estéreo, hasta 140 Mbit/seg, la cual permite video en color de alta definición. En la siguiente tabla se enlistan algunas de las señales que se deberán introducir en la red local con fibra óptica, así como la velocidad de transmisión asociada a ellas:

216 Mbps.....	TV a color de alta definición.
140 Mbps.....	TV a color.
70 Mbps.....	TV a color (codificación con reducción de redundancia).

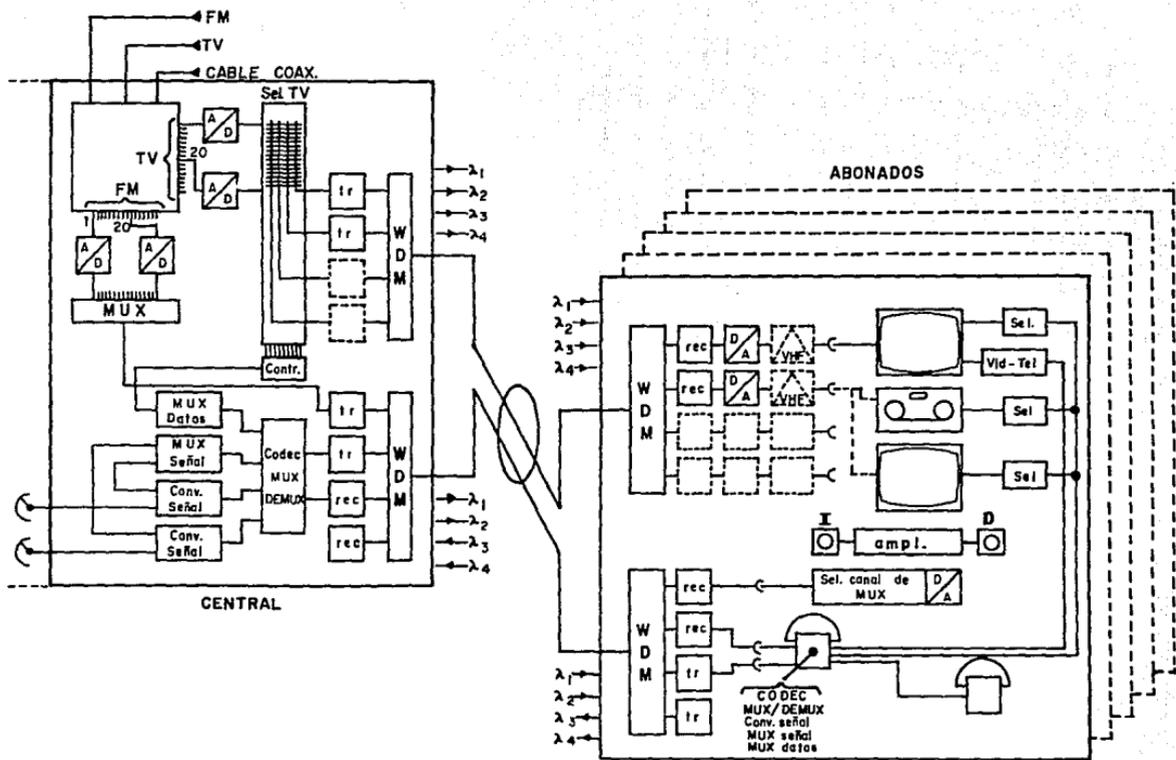


FIG. B-2 POSIBLE RED LOCAL POR FIBRAS OPTICAS

- 8.45 Mbps.....TV a color (codificación con alto grado de reducción de redundancia).
- 2.05 Mbps.....Video conferencia en blanco y negro.
- 1.5 Mbps.....Videoteléfono.
- 1.3 Mbps.....Sonido estéreo.

Los valores de velocidad dados anteriormente son en realidad mayores a los necesarios para obtener una buena transmisión de la señal, sin embargo, se tiende a tomar los anteriores valores como estándares a fin de reducir problemas en el procesamiento de la señal. Otra razón para hacer ésto es que el ancho de banda de la fibra óptica lo permite.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, en la Fig. B-2 se muestra lo que podría ser una red local con fibra óptica. En ésta red se realiza una transmisión digital en todas las señales; se cuenta con dos fibras ópticas conectadas a cada abonado y cuatro longitudes de onda por fibra, de modo tal, que una de las fibras transporta cuatro programas de TV con 140 Mbps en cada programa. La otra fibra puede usarse para transportar hasta 30 canales de estéreo usando multiplexaje por división en el tiempo y un canal de 42 Mbps para teléfono, señales de control en ambas direcciones (éstas señales servirían para que el abonado pudiera seleccionar el programa de TV que quisiera recibir) y

por último, un canal de banda amplia para nuevos servicios.

La central local, en éste caso, sería igual que una central telefónica común, agregándole a ésta, dispositivos para la transmisión de programas de TV y sonido FM, conversión analógico-digital para cada programa, conmutador para la selección del programa de TV deseado y un multiplexor para colocar los 30 programas de estéreo en un solo tren de datos.

El abonado podría usar el equipo que actualmente se dispone (televisión, Hi-Fi, etc.), agregándole circuitería bastante sencilla y económica, como selectores de programas.

El primer sistema de éste tipo fue realizado en Higashi Ikoma Japón. Fue diseñado como un proyecto experimental para la transmisión de señales digitales entre terminales de abonados y un centro de cómputo. Otro ejemplo de éste tipo de redes es el sistema Biarritz, el cual fue instalado por el gobierno francés en la ciudad de Biarritz. En la primera etapa daba servicio a 1 500 abonados y había posibilidad de expandirlo a 5 000.

En la actualidad la aplicación de las redes locales con fibra óptica es realizada en forma experimental y comercial en varios países. En el caso de México existen proyectos bastante ambiciosos para que, en un futuro cercano, se disponga de éstos sistemas.

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

- Optical Fiber Communications
Keiser, Gerd
Mc Graw-Hill, 1984.

- An Introduction to Optical Fiber
Cherín, Allen H.
Mc Graw-Hill, 1983.

- Fiber Optics Communications, Experiments and Projects
Boyd, Waldo C.
Howard W. Sams and Co., Inc., 1982.

- Semiconductor Devices for Optical Communication
Autores varios
H. Kressel, 1980.

- Telecomunicaciones Vía Fibras Ópticas
Autores varios
División de Educación Continua F. I., U.N.A.M., 1986.

- Fiber Optics Communications
Palais, Joseph C.
Prentice-Hall, 1985.

- Biblioteca Básica de Electrónica No. 38, Comunicaciones Ópticas
Autores varios
Nueva Lente, 1986.

- Optical Fiber Communications Principles and Practice
Senior, John
Prentice-Hall, 1985.

- Fiber Optics
Lacy, Edward A.
Prentice-Hall, 1982.

- Information, Transmission, Modulation and Noise
Mischa, Schwartz
Mc Graw-Hill, 1981.

- Introducción a la Teoría y Sistemas de Comunicación
Lathi, B. P.
Límusa, 1983.

- Fiber Optic Design and Applications

Baker, Donald G.

Prentice-Hall, 1985.

- Sistemas de Comunicación

Carlson, A. Bruce

Mc Graw-Hill, 1982.

- Comunicaciones por Fibra Optica

Díaz de la Iglesia, Raimundo

Marcombo, 1985.

- Informe Técnico: Comunicaciones Opticas en la Red de Abonado

López Reyes, Raúl L.

C I N V E S T A V , 1984.

- Satellite Link Analysis

Autores varios

Scientific - Atlanta Satellite Communications Symposium '81.

- Comunicación Vía Satélite

Autores varios

División de Educación Continua F. I., U.N.A.M., 1986.

- Revista: Teledato

Méndez Villarreal, León

Publicaciones Telecomex

No. 32	-----	Dic. - 1984.
No. 33	-----	Mar. - 1985.
No. 34	-----	Jun. - 1985.
No. 35	-----	Sep. - 1985.
No. 36	-----	Dic. - 1985.

- Revista: Telecom Report

Autores varios

Siemens

Vol. 3	-----	1980	-----	3/80
Vol. 4	-----	1981	-----	4/81
Vol. 7	-----	1984	-----	4/84
Vol. 8	-----	1985	-----	1/85
Vol. 9	-----	1986	-----	4/86

- Revista: Electronics

Autores varios

Mc Graw-Hill

Vol. 51	---	No. 23	---	1978
Vol. 51	---	No. 24	---	1978
Vol. 51	---	No. 26	---	1978