

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



FIBRAS OPTICAS

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA:  
ROBERTO CARLOS ROSALES SOLIS

ASESOR: ING. RENE LEOPOLDO VILLARREAL

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1998

T  
TK510  
.59  
R67  
1998  
c.1

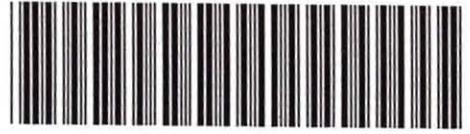
PK5103

.59

R67

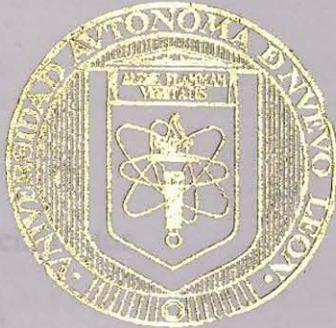
998

0.1



1080096858

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



Agradecimientos

Prólogo

Cap. 1.- Nacimiento de la Fibra Óptica

Cap. 2.- Características de las Fibras Ópticas

Cap. 3.- Conexiones y Empalmes

Cap. 4.- Sistemas de Comunicación

Cap. 5.- Fuentes y Transmisores Ópticos

Cap. 6.- Detectores

Cap. 7.- Redes de Comunicaciones

FIBRAS OPTICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA:

ROBERTO CARLOS ROSALES SOLIS

ASESOR: ING. RENE LEOPOLDO VILLARREAL

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1993

T  
TK5103

.59

R67

1995



# ÍNDICE

	<i>PÁGINA</i>
Agradecimientos	A
Prólogo	B
Cap.1. Nacimiento de la Fibra Óptica	1
Cap.2.- Características de las Fibras Ópticas	9
Cap.3.- Conectores y Empalmes	15
Cap.4.-Sistemas de Comunicación	21
Cap.5.- Fuentes y Transmisores Ópticos	26
Cap.6.- Detectores y Receptores Ópticos	34
Cap.7.- Redes de Comunicaciones	40

# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, antes que nada, a Dios por seguir apoyándome a concluir una más de mis metas en la vida y por apoyarme cuando más lo he necesitado.

A mi Padre (Carlos L. Rosales Mar) por su valioso apoyo durante esta larga trayectoria. Por haber sacrificado tantas y tantas cosas para no truncar mi carrera profesional.

A mi Madre (Gloria Solís de Rosales) por tener tanta confianza en mí, y siempre apoyarme en todas mis decisiones. Por haberme enseñado a confiar en mí mismo y nunca dudar de mis sueños e ilusiones.

A mi Hermana (Gloria María Rosales Solís) por haberme enseñado, con su ejemplo, la dedicación y la determinación que se requieren para lograr cualquier objetivo, por pequeño que este parezca.

A mis Amigos (los cuales considero como una gran familia), que siempre estuvieron apoyándome, tanto en las buenas como en las malas.

A mi ahora Novia (Citlalic Karina Sanchez Garza) por haber sido la razón de muchos de mis esfuerzos para concluir mi carrera profesional.

A aquellos Maestros de quienes aprendí a salir adelante y tartar de ser siempre el mejor.

Y a todas las personas que no mencioné en esta página, pero que de una u otra manera me apoyaron para salir adelante en esta parte de mi trayectoria académica.

## *Proverbios 4.5-9*

*Adquiere sabiduría, adquiere inteligencia: No te olvides ni te apartes de las razones de mi boca;*

*No la dejes y ella te guardará; ámalala y te conservará.*

*Sabiduría ante todo; adquiere sabiduría; y sobre todas tus posesiones adquiere inteligencia.*

*Engrandécete y ella te engrandecerá; ella te honrará cuando tu la hayas abrazado.*

*Adorno de gracia dará a tu cabeza; corona de hermosura te entregará.*

# PRÓLOGO

Actualmente la utilización de la fibra óptica es cada vez mayor para diferentes y muy variados tipos de aplicaciones, tanto en el campo de la medicina, la industria, las comunicaciones, en el ámbito militar y de la investigación, etc..

Específicamente en el campo de las comunicaciones, la fibra óptica ha ocupado un lugar muy importante dada las diferentes aplicaciones que con ella se pueden lograr, tanto como medio de transmisión de datos así como para crear una infraestructura capaz de lograr la comunicación a través de líneas digitales y con esto obtener todos los beneficios que trae consigo esta tecnología digital.

En este trabajo trato de abarcar todo lo relacionado a las fibras ópticas en lo que al campo de las comunicaciones se refiere, tanto su invención como su fabricación; así también como los conectores utilizados para las diferentes aplicaciones, su principio, etc.

Aunque basado en el desarrollo de la fibra óptica en general, trato de inclinar al lector hacia la aplicación de la fibra óptica en el campo de las comunicaciones, en las redes de transmisión de datos, voz y vídeo; esto con el fin de tener una perspectiva un poco más amplia en lo que a redes LAN (Local Area Network) y WAN (Wide Area Network) se refiere.

Solo con el fin de proporcionar una fuente más de información para la población estudiantil, presento esta tesina que espero sea del interés de todos y cada uno de los que, en algún momento, lleguen a tenerla en sus manos.

## CAP. 1.- NACIMIENTO DE LA FIBRA ÓPTICA

### ANTECEDENTES

En 1870 John Tyndall, filósofo natural que vivió en Inglaterra demostró uno de los primeros sistemas de luz guiada a la Real Sociedad. Su experimento consistía en usar el agua como medio para probar la desviación de los rayos de luz, demostrando así el principio de la reflexión total interna.

Él llenó un contenedor con agua e hizo un orificio en el fondo del mismo para permitir que esta escapase a través de él; el agua escapó por el orificio formando una parábola mientras se depositaba en otro contenedor localizado cierta distancia debajo del primero (ver fig. 1.1). Durante el movimiento del agua de un contenedor a otro, Tyndall dirigió un rayo de luz dentro del orificio a través del cual escapaba el agua. La luz siguió un movimiento de zigzag a través de la parábola formada, es decir, observó que los rayos de luz viajando a través del agua no escapaban hacia el aire sino hasta que excedían un ángulo crítico.

Durante el comienzo de la década de los 50's, los investigadores experimentaron con varas de cristal flexibles para examinar el interior del cuerpo humano. En 1958 Charles Townes y Arthur Schawlow de los laboratorios Bell hicieron teórico el uso del láser como una intensa fuente de luz. Para el año 1960, Theodore Mainman del laboratorio de investigaciones Hughes ya había trabajado con el primer láser. Este hecho marcó la posibilidad de usar luz como medio de transmisión en las guías de onda para señales de comunicación

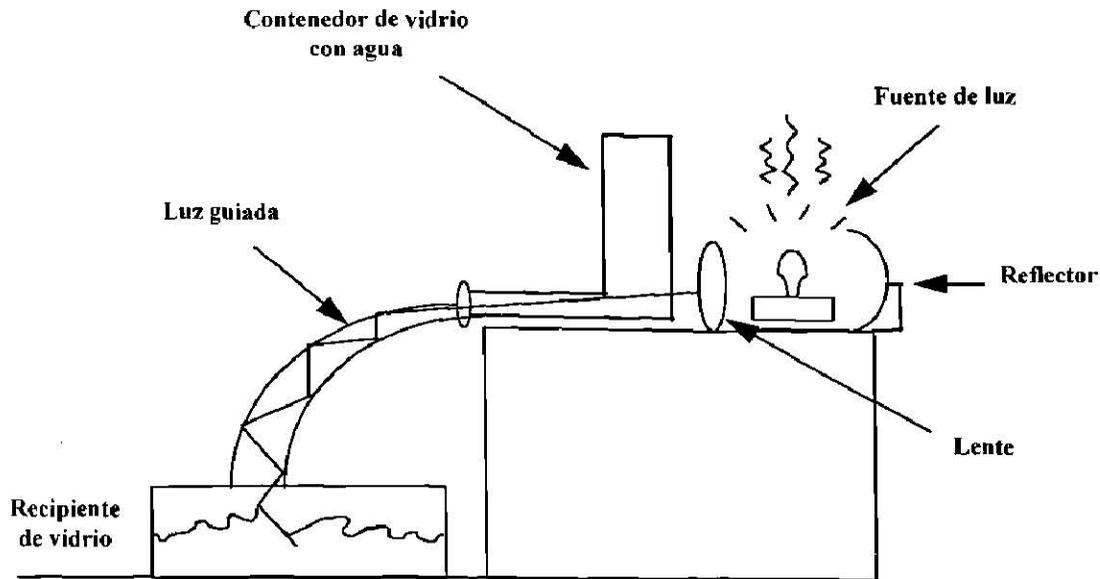


Fig. 1.1 El uso del agua como guía óptica.- Basada en el experimento de John Tyndall en 1870.

### INTRODUCCIÓN A LA LUZ

En términos simples, la luz puede definirse como parte del espectro visible que tiene una longitud de onda entre 0.4  $\mu\text{m}$ . Y 0.7  $\mu\text{m}$ . (ver fig. 1.2). Esta definición debe ser extendida para el uso en el campo de las comunicaciones ópticas (luz guiada) debido a la variedad de fuentes de luz usadas para transmitir esta información (700 a 1600 nm.). La longitud de onda de la luz es extremadamente pequeña, tanto que sus magnitudes son medidas en angstroms (unidad de medición equivalente a  $1 \times 10^{-11}$  m.). En la industria de la fibra los términos usados mas frecuentemente para medir la longitud son los micrómetros y los nanómetros.

## PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Para poder entender el mecanismo de la propagación de la luz, es necesario primeramente definir dos características muy importantes de esta: reflexión y refracción.

**Reflexión.-** Es bien sabido que la luz se refleja en las superficies lisas, como por ejemplo en los espejos; fenómeno llamado reflexión especular. Este fenómeno se ilustra en la fig. 1.3. El ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia en este tipo de reflexión. Cuando la superficie es irregular, el ángulo de reflexión es completamente aleatorio, ya que no solo depende del ángulo de incidencia, sino también de la superficie sobre la que éste se refleje. Este tipo de reflexión se llama reflexión difusa y se ilustra en la fig. 1.4. El resultado de este fenómeno puede comprobarse muy fácilmente utilizando la página que se esta leyendo en este momento.

La luz blanca, que incluye todos los colores, se refleja de manera difusa en la superficie de la página ya que tiene una aspereza aleatoria, y debido a que el papel no absorbe mucha luz, esta parece radiar de todas partes de la página. Podemos resumir este fenómeno (reflexión), como el cambio de dirección que experimenta un haz de luz al incidir en una superficie sin que éste cambie de medio de propagación.

### LEYES DE REFLEXIÓN.

- En la reflexión especular, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se localizan en el mismo plano.

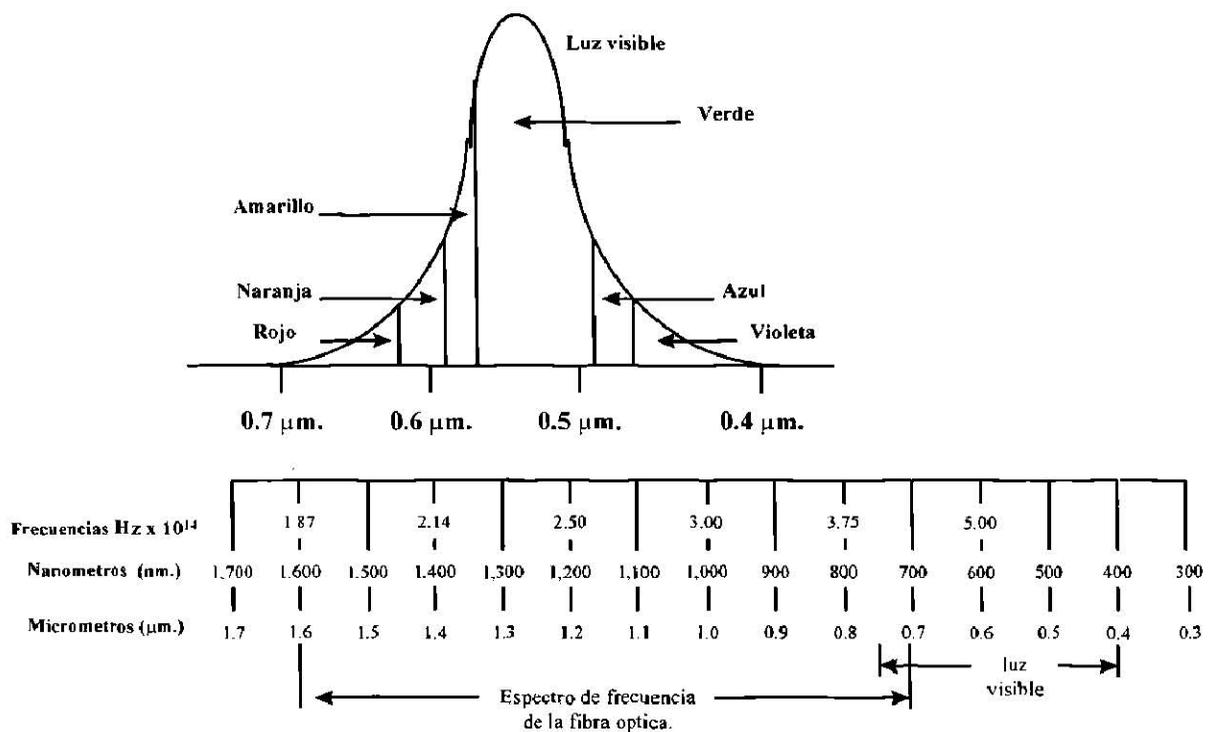


Fig. 1.2 Espectro de frecuencias de la luz- visible e invisible-

### REFRACCIÓN.

La refracción es causada por el cambio de velocidad de un haz de luz al pasar a través de diferentes medios de propagación, tales como el agua, aire, vidrio y otras sustancias transparentes (ver fig. 1.5). Este fenómeno es evidente cuando los objetos son vistos a través de un vidrio a agua por ejemplo, como se ilustra en la fig. 1.6.

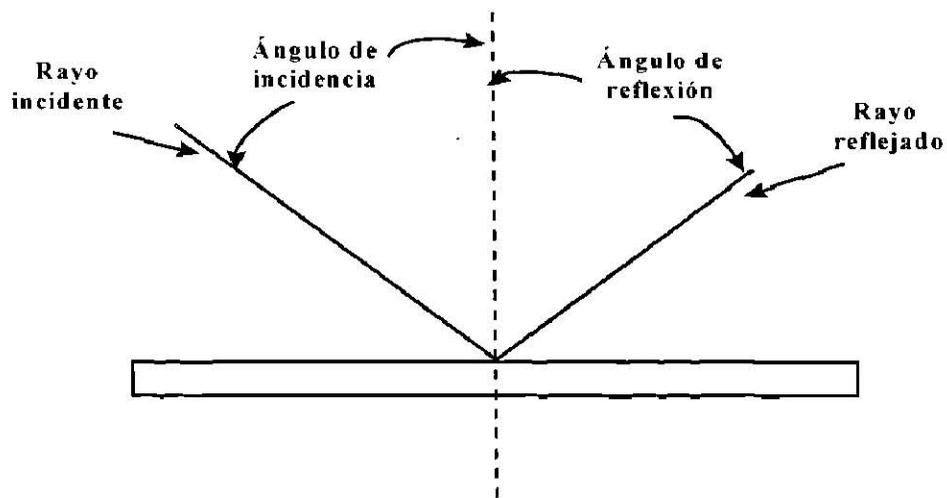


Fig. 1.3 Reflexión

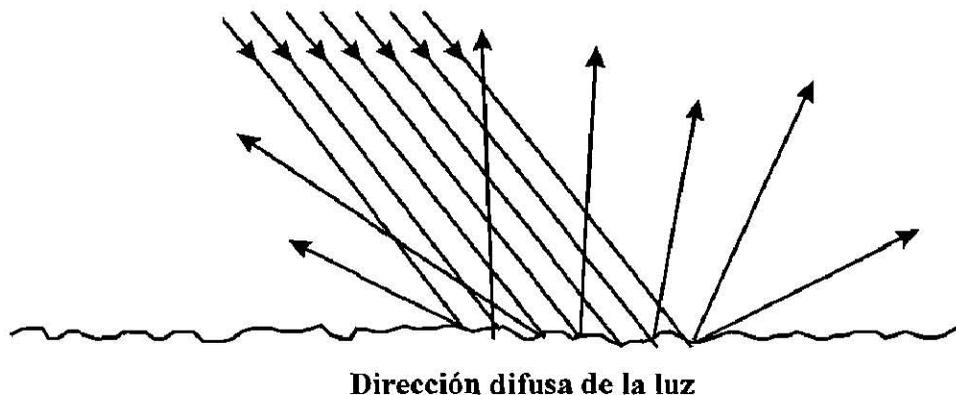


Fig. 1.4 Reflexión difusa.

### LEY DE SNELL.

La forma en la cual se refracta un rayo en la interfase entre dos materiales cuyos índices de refracción son  $n_1$  y  $n_2$ , esta dada por la Ley de Snell:

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

donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de los rayos incidente y refractado respectivamente, con respecto a la normal al plano de la interfase entre los medios de propagación. Debido a que la ecuación se aplica a la luz que se mueve a lo largo de un rayo, un rayo de luz sigue la misma trayectoria cuando su dirección es invertida.

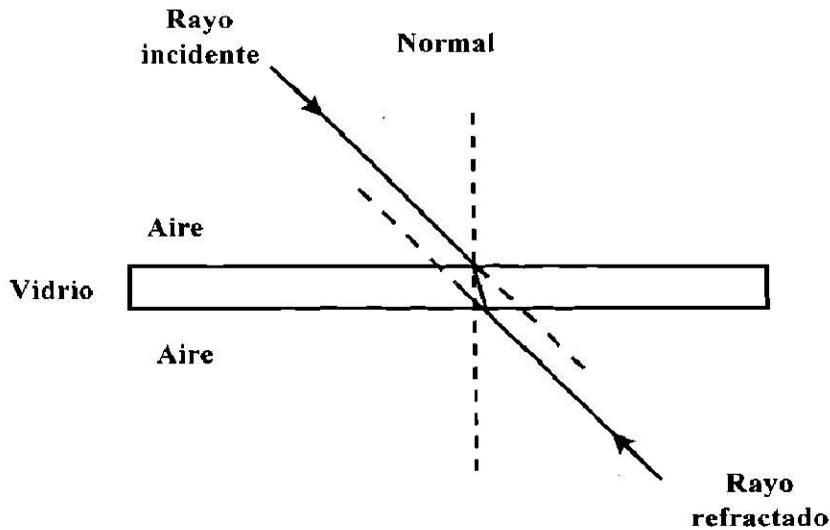


Fig. 1.5 Refracción.

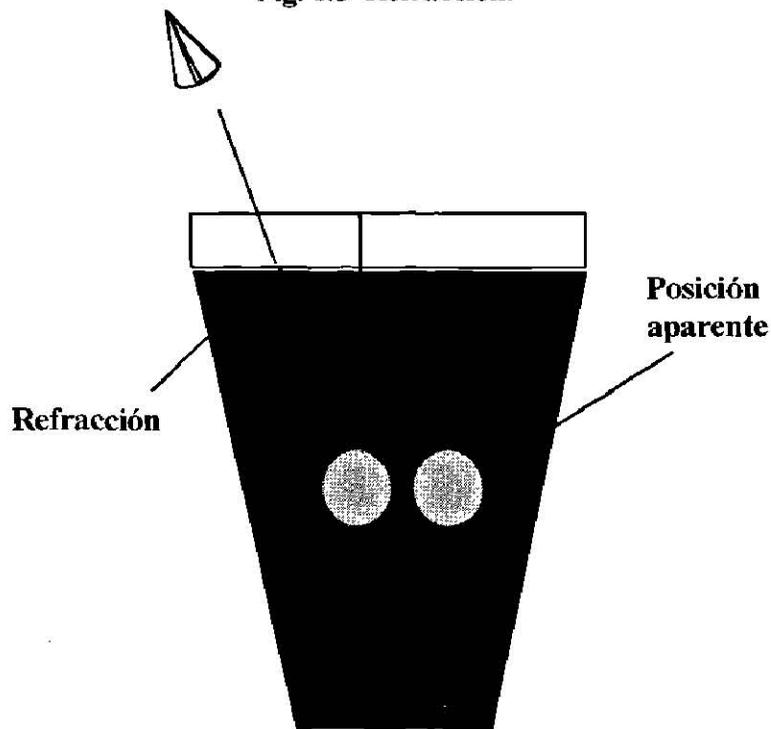


Fig. 1.6 Objeto suspendido dentro de un vaso de agua.

### LEYES DE REFRACCIÓN.

- El rayo incidente, la normal al plano, el rayo reflejado y el rayo refractado, están en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia y el ángulo de refracción se encuentran relacionados por la Ley de Snell.

De lo anterior podemos deducir que la refracción es el cambio de dirección que experimenta un haz de luz al pasar de un medio de propagación a otro. De la Ley de Snell se observa que si  $n_2 > n_1$ , el ángulo de refracción tiende a cero; y si  $n_2 < n_1$ , el ángulo de refracción tiende a  $90^\circ$ , es decir, si  $n_2 > n_1$ , entonces  $\theta_1 > \theta_2$ ; y si  $n_2 < n_1$ , entonces  $\theta_1 < \theta_2$ .

## ÁNGULO CRÍTICO.

Al observar la fig. 1.5 podemos percatarnos de la existencia de un ángulo crítico de incidencia, el cual hará que el haz de luz se refracte sobre la interfase entre los medios de propagación, es decir, que el ángulo de refracción sea igual a  $90^\circ$ .

Para determinar este ángulo crítico de incidencia, recurriremos a la ecuación de la Ley de Snell:

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

de la cual al hacer  $\theta_2 = 90^\circ$ , nos queda de la sig. manera:

$$n_1 \text{ sen. } \theta_1 = n_2 \text{ sen. } (90^\circ)$$

y ya que el  $\text{sen. } (90^\circ) = 1$ , podemos reducir la ecuación a:

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

por lo tanto...

$$\text{sen. } \theta_1 = n_2/n_1$$

relación con la cual podemos calcular el ángulo crítico de incidencia de un haz de luz de un medio de propagación con un índice de refracción  $n_1$ , a otro con diferente índice de refracción  $n_2$ . El índice de refracción de cualquier medio puede determinarse con la sig. relación:

$$n = c/v$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s) y  $v$  es la velocidad de la luz en el medio de propagación. Cada substancia transparente tiene su propio índice de refracción como se muestra en la tabla 1.1.

TABLA 1.1

MATERIAL	ÍNDICE, $n$
VACÍO	1.0
AIRE	1.0003 (1)
AGUA	1.33
CUARZO FUNDIDO	1.46
VIDRIO	1.5
DIAMANTE	2.0
SILICIO	3.4
ARSENURO DE	3.6

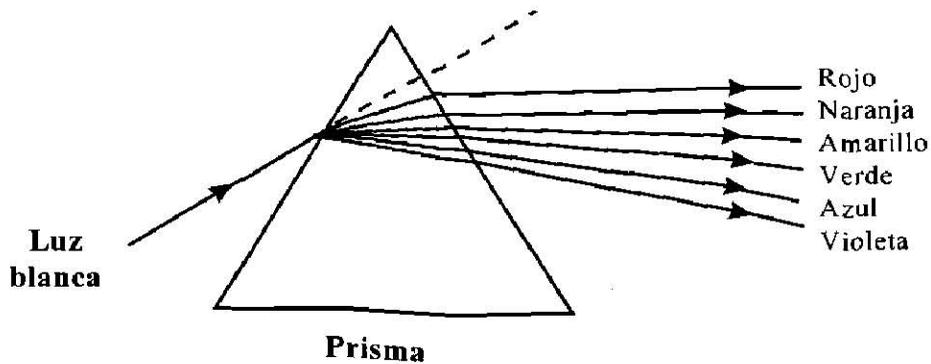
## DISPERSIÓN, DIFRACCIÓN, ABSORCIÓN Y SCATTERING.

Dispersión es el proceso de separar la luz en cada una de las frecuencias que la componen. Es muy común reconocer este fenómeno cuando la luz solar se dispersa en un arcoiris de colores utilizando un prisma (ver fig. 1.7a).

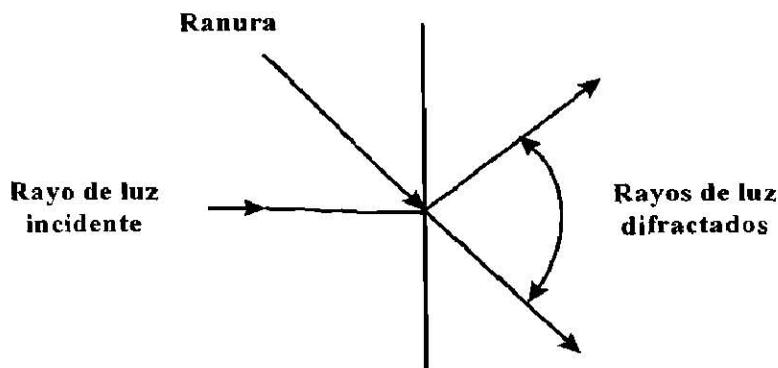
Difracción es la desviación de la luz al pasar a través del orificio de un obstáculo (ver fig. 1.7b).

La absorción se realiza cuando la luz choca contra una superficie negra (superficie lisa), y es convertida en calor a través de un intercambio de energía con los átomos de la superficie; en este caso la reflexión es mínima, e incluso en algunos casos llega a ser nula.

Otro fenómeno denominado scattering, ocurre cuando la luz choca contra alguna sustancia o imperfección y emite luz a su alrededor a la misma longitud de onda de la luz incidente (ver fig. 1.8). Si la sustancia emite luz a una longitud de onda mayor que la de la luz incidente, este fenómeno es llamado luminiscencia.



a)



b)

Fig. 1.7 a) Dispersión y b) Difracción

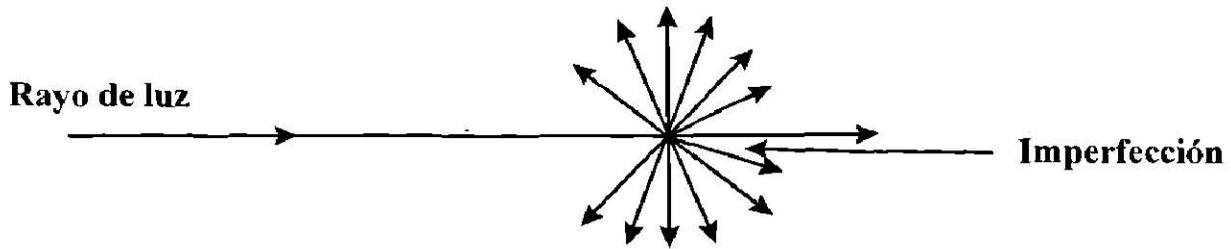
Ejemplos de luminiscencia se pueden observar en las carátulas de los relojes que brillan en la oscuridad, debido a la absorción de luz durante el día y la emisión de luz (ya que los átomos regresan a su estado normal) durante la noche. La cantidad de energía contenida en la luz es determinada, hasta cierto punto, por la longitud de onda o por la frecuencia. Solo como comparación, la luz ultravioleta tiene 100 veces el nivel de energía de la luz roja visible. La energía de un fotón (partícula de luz) puede ser calculada por la sig. ecuación:

$$E = h f \text{ (Joules por fotón)}$$

donde:

$h = 6.63 \times 10^{-34}$  (constante de Plank)

$f$  = Frecuencia (longitud de onda)



**Fig. 1.8 Fenómeno llamado Scattering.**

## DESARROLLO DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Las fibras ópticas utilizadas en comunicaciones deben tener una estructura y un diseño que permita su utilización en los mas variados ambientes, en múltiples configuraciones y además deben cumplir con los requerimientos ópticos de transmisión.

Por esta razón son muy importantes, tanto los materiales como el proceso que se elija para la fabricación de las fibras ópticas. Deben utilizarse materiales que cumplan con las características mecánicas y ópticas deseadas en la fibra. Algunos de los requisitos que deben satisfacer estos materiales son:

- Que puedan ser transformados en fibras largas, delgadas y flexibles.
- Que sea transparente a una longitud de onda en particular, para que la fibra conduzca eficientemente la luz.
- Escoger los materiales físicamente compatibles entre sí, pero con pequeñas diferencias en sus índices de refracción. El vidrio y el plástico son los materiales que mejor satisfacen estos requisitos.

La manufactura y construcción de la fibra básica es algo complicada. En pocas palabras, un tubo de cuarzo altamente refinado que será eventualmente llenado con una combinación de gases (silicio, tetracloruro, tetracloruro de germanio), es seleccionado para empezar el proceso. Este tubo de alrededor de 4 ft. de largo y 1 in. de diámetro, es colocado en un torno y los gases son inyectados dentro del tubo hueco. El tubo es girado sobre una flama y sometido a temperaturas de alrededor de 1600°F. Al quemarse los gases producen un depósito en el interior del tubo. Esta preforma (el tubo de cuarzo con el depósito de gas), es entonces calentada alrededor de 2100°F, derritiendo y colapsando el tubo hasta 13 mm. Para entonces el cuarzo preformado ya esta listo para ser colocado en la torre vertical.

La vara de cuarzo, habiendo entonces experimentado el proceso de deposición de vapor químico modificado (MCVD), es ahora colocado en la torre vertical donde será calentada a una temperatura mayor (2200°F) y posteriormente, enfriado por medio de una computadora que controla el derretimiento y la forma que tomará, que finalmente será de una fibra muy fina y de alta calidad, de aproximadamente 125  $\mu\text{m}$ . de diámetro y de alrededor de 6.25 km. de longitud. El centro ópticamente puro, llamado núcleo (que es tan pequeño que apenas alcanza 8  $\mu\text{m}$ . de diámetro), está rodeado por un cuarzo menos ópticamente puro, llamado revestimiento. El revestimiento de aproximadamente 117  $\mu\text{m}$ . de diámetro es la frontera del material formado durante el proceso MCVD.

## APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

En la siguiente tabla vemos, en porcentaje, una muestra de las aplicaciones de las fibras ópticas en la actualidad.

Telecomunicaciones	66%
Militar	16%
Computación y redes locales	11%
Industria	5%

	Designación	Medio de transmisión		Aplicación	
10 <sup>-6</sup> m	Ultravioleta	Fibras ópticas	Haz de Láser	Teléfono datos video	10 <sup>15</sup> Hz
	Visible				10 <sup>14</sup> Hz
	Infrarrojo				10 <sup>14</sup> Hz
1 cm	Ondas milimétricas	Guía de onda	Microondas radio	Navegación Satélite-Satélite Tierra-Satélite Radar	100 GHz
10 cm	Super alta frecuencia (SHF)				10 GHz
1 m	Ultra alta frecuencia (UHF)	Cable coaxial	Radio de onda corta	UHF TV Aeronáutica VHF y FM	1 GHz
10 m	Muy alta frecuencia (VHF)				100 MHz
100 m	Alta frecuencia (HF)				10 MHz
1 km	Media frecuencia (MF)	Par alámbrico	Radio de onda larga	Negocios Radio amateur banda civil Radio difusión AM	1 MHz
10 km	Baja frecuencia (LF)				100 KHz
100 km	Muy baja frecuencia (VLF)				10 KHz
	Audio				1 KHz

Frecuencia

## CAP. 2 CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

### APERTURA NUMÉRICA

Una característica importante de las fibras ópticas es su habilidad de coleccionar luz emitida por una fuente. Cuando se acopla una fuente a una fibra, se presentan dos mecanismos de pérdidas, uno de ellos está relacionado al desacoplamiento del área y el otro está relacionado con la apertura numérica.

El desacoplamiento del área se presenta cuando el patrón de radiación de la fuente (cono de la emisión de luz), es más grande con respecto al área transversal del núcleo. Existen dos medios para reducir este problema: el primero consiste en reducir la distancia entre la fuente y la fibra; el segundo consiste en emplear fuentes con patrones pequeños de radiación, y en particular más pequeños que el núcleo. Cuando es inevitable que exista cierta distancia entre la fibra y la fuente, se pueden reducir las pérdidas por desacoplamiento de área empleando lentes para concentrar el haz de luz.

Aunque el área iluminada por la fuente sea menor que el área del núcleo, existen otras pérdidas asociadas con el hecho de que las fuentes tienen un cono de emisión. Si el cono de emisión de la fuente es más grande que el cono de aceptación de la fibra, la energía del rayo que no sea contenida dentro del cono de aceptación no será acoplada a la fibra óptica. El ángulo de aceptación está relacionado con el ángulo crítico, esta relación se ilustra en la fig. 3.10.

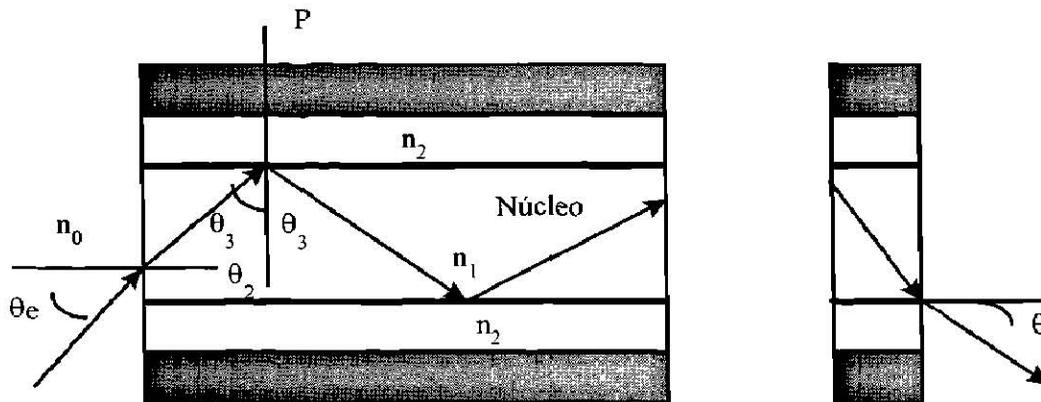


Fig. 2.1 Relación entre el ángulo de aceptación y el ángulo crítico.

El ángulo mínimo de incidencia en la frontera del núcleo y la cubierta óptica para obtener reflexión total es el ángulo crítico, por lo tanto, de la fig. 3.10 y empleando la Ley de Snell se tiene

$$\theta_c = \theta_3 (\text{mín.}) = \text{sen}^{-1} (n_2/n_1)$$

$\theta_2$  es el ángulo complementario de  $\theta_3$ , por lo tanto, aplicando la identidad trigonométrica...

$$\text{sen}^2 a + \text{sen}^2 b = 1$$

y aplicando la Ley de Snell en la superficie de entrada, suponiendo que el medio de donde incide el rayo es el aire, se tiene:

$$\text{sen } \theta_e (\text{máx.}) = n_1 \text{ sen } \theta_2 = (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}$$

donde

$\theta_c$  es el ángulo máximo del rayo con respecto a la normal a la superficie de la fibra, para el cual la reflexión interna total tiene lugar en la frontera núcleo-cubierta óptica.

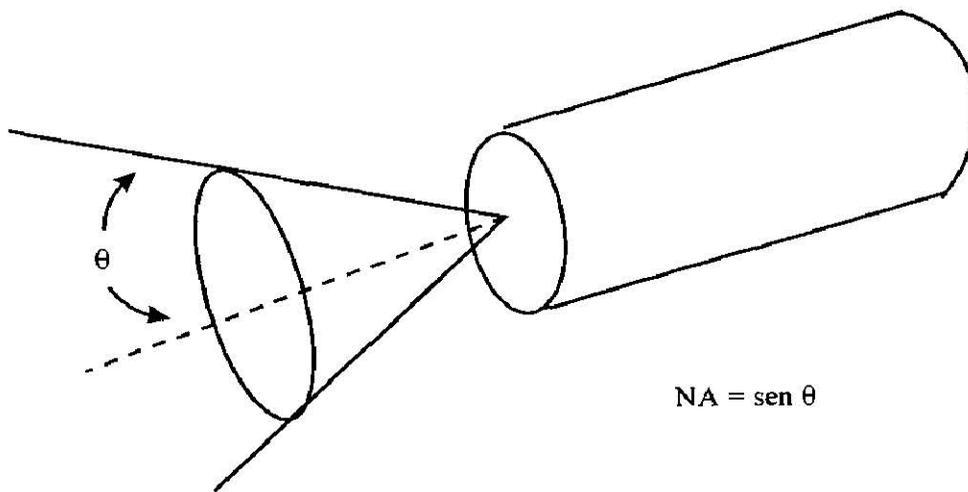
A este ángulo se le denomina ángulo de aceptación y a su función seno se le denomina apertura numérica (NA)

$$NA = \text{sen } \theta_c \text{ (máx.)} = (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}$$

si se supone que el ángulo de aceptación es pequeño, entonces el ángulo sólido de aceptación ( $\Omega$ ) se puede aproximar a:

$$\Omega = \pi NA^2$$

Una representación gráfica de los rayos que puede aceptar una fibra óptica se muestra en la fig. 2.2, donde el cono de aceptación tiene un ángulo de  $20^\circ$ .



**Fig. 2.2 Representación del ángulo de aceptación de una fibra óptica**

Si la fibra es de índice gradual se tiene que la NA es igual a:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

donde

$n_1$  es el índice de refracción en el centro del núcleo. La potencia acoplada a una fibra puede expresarse como:

$$P_A = P_T \left[ 1 - (\cos \theta)^{m+1} \right]$$

donde

$P_A$  es la potencia acoplada a la fibra;

$P_T$  es la potencia total en el núcleo;

$m$  es un parámetro definido por el patrón de radiación de las fuentes, para el LED de superficie,  $m=1$ .

El porcentaje de acoplamientos típicos de diferentes fuentes a diferentes fibras se muestra en la tabla 3.1.

FUENTE	FIBRAS		
	Multimodo índice escalonado d=100 μm. del núcleo	Multimodo 50 μm. del núcleo	Monomodo 90 μm. del núcleo
LED	10 %	1 %	<1 %
LASER		50 %	10 %

Tabla 2.1 Acoplamientos típicos de LED y LASER en fibras ópticas.

## MODOS DE PROPAGACIÓN

El modo de propagación se refiere en esencia a los caminos ópticos que sigue la luz dentro de la fibra óptica. El modo de propagación básicamente se determina de acuerdo a la frecuencia, el diámetro del núcleo y la variación del índice de refracción. Sin embargo, el tipo de fibra también es otro factor indispensable en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de la fibra.

## DESIGNACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS

La propagación de las ondas de luz están confinadas en el núcleo de la fibra.

- Aquellos modos cuyo campo  $E_z$  es mas fuerte comparado con el campo  $H_z$  a lo largo de la dirección de propagación, se le llama EH.
- Aquellos modos cuyo campo  $H_z$  es mas fuerte comparado con el campo  $E_z$  a lo largo de la dirección de propagación, se le llama HE.

Estos modos (EH,HE) tienen seis componentes de campo y no poseen simetría circular. Dependiendo de la forma en que se propaguen los modos dentro de la fibra óptica son del modo monomodo y multimodo.

## DISPERSIÓN MODAL

La dispersión modal en una fibra óptica, está en función del diámetro del núcleo, frecuencia y la longitud de la fibra óptica. La dispersión modal es una característica despreciable en las fibras ópticas.

## ANCHO DE BANDA

Un parámetro que caracteriza la capacidad de transmisión de la fibra está basado en el ensanchamiento que experimenta un pulso que se propaga a través de la fibra. El ancho de banda esta definido por la siguiente ecuación:

$$AB = \frac{0.44}{\Delta t_{\text{multimodo}}} \quad (\text{MHz} \cdot \text{Km.})$$

donde  $\Delta t$  es el ensanchamiento del pulso (ns.).

## TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS

**Fibras multimodo de índice gradual.**- Puesto que índice de refracción es una medida de la disminución de la velocidad de la luz que viaja en el medio, se puede hacer un núcleo cuyo índice disminuya conforme se acerque a la cubierta óptica, de tal manera que la velocidad de los rayos de luz crezca conforme los rayos se alejan del centro. De esta manera se puede lograr que los rayos de modos altos lleguen al mismo tiempo que los rayos de modos bajos en el otro extremo de la fibra óptica, resultando en una disminución de la dispersión multimodal.

**Fibra monomodo de índice escalonado.**- Otra forma de reducir la dispersión multimodal es permitiendo que se propague un solo modo. Esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo y eligiendo la relación de índices de refracción del núcleo y de la cubierta óptica. A este tipo de fibras se denomina fibras ópticas monomodo. Una representación de la propagación de la luz a través de una fibra monomodo se muestra en la Fig. 3.15.

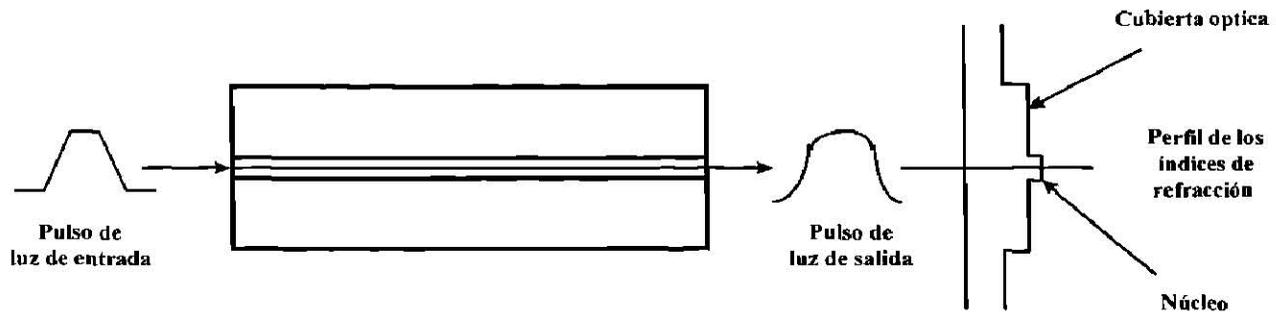


Fig. 2.3 Propagación a lo largo de una fibra óptica monomodo.

En las fibras multimodo de índice gradual se ha reducido la dispersión multimodal con respecto a la dispersión sufrida por el pulso de luz cuando se propaga a lo largo de la fibra óptica de índice escalonado, por lo tanto, si se tiene un enlace de una determinada longitud, las fibras multimodo de índice gradual pueden llevar información a mayor velocidad que las fibras multimodo de índice escalonado.

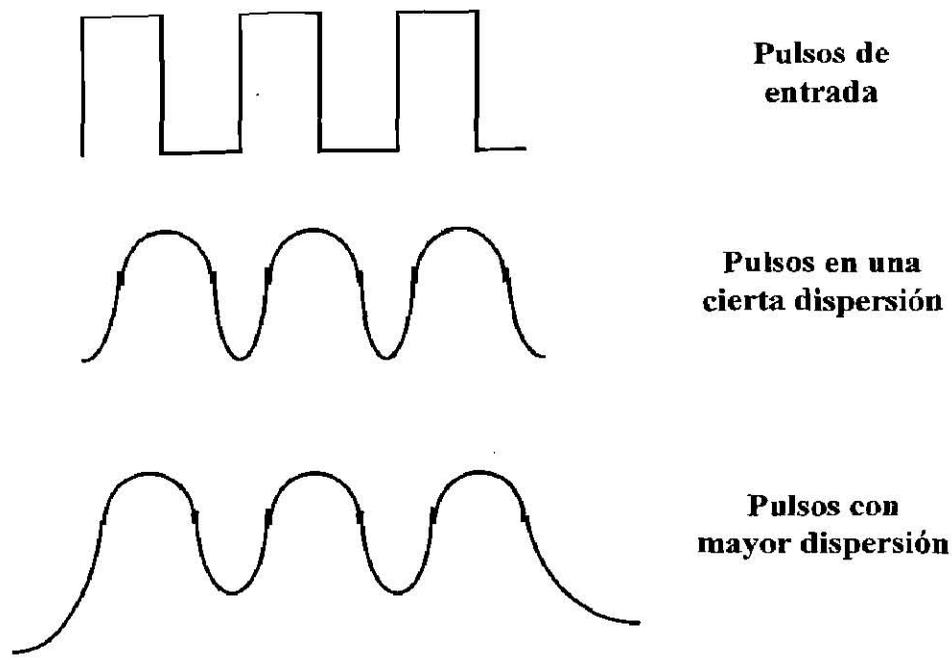
En las fibras monomodo, la dispersión multimodal se ha reducido a cero, ya que solo se propaga un solo modo, y es por este motivo que las fibras ópticas monomodo pueden transmitir simultáneamente mayores volúmenes de información, en comparación con las fibras ópticas multimodo.

Existen otras causas que introducen atenuación en los pulsos que se propagan a través de la fibra óptica, los principales son defectos atómicos, dispersión de Rayeigh, inhonogeadades en el material del núcleo y curvaturas tanto a nivel microscópico como macroscópico. Las fibras ópticas sufren otro tipo de dispersión, la cual está asociada al hecho de que las fuentes ópticas no son monocromáticas, a este tipo de dispersión se le denomina cromática, y se debe principalmente a dos fenómenos físicos: dispersión de material y dispersión de guía de onda.

**Dispersión de material.**- Los materiales que se emplean para fabricar las fibras ópticas tienen índices de refracción como función de la longitud de onda de la luz, y por lo tanto la velocidad de onda de los fotones es función de su longitud.

**Dispersión de guía de onda.**- Esta dispersión es causada por la diferencia de las características modales de la longitud de onda.

Una forma de disminuir la dispersión cromática es emplear fuentes de alta coherencia. Si la dispersión cromática es excesiva, se puede perder la información. Como ejemplo ilustrativo supóngase que se tiene un tren de pulsos como el de la Fig. 2.4.



**Fig. 2.4** Ensanchamiento del pulso a causa de la dispersión cromática de las fibras.

En las fibras multimodo tanto de índice escalonado como de índice gradual, generalmente la dispersión multimodal es mayor que la dispersión cromática, por lo tanto, esta última se desprecia en un buen número de aplicaciones de telecomunicaciones.

La dispersión multimodal en fibras multimodo también es función de longitud de la fibra, y es mucho mayor en las fibras de índice escalonado en comparación con la dispersión introducida por fibras multimodo de índice gradual. Valores típicos de dispersión multimodal se muestran en la tabla 3.2.

FIBRA	ÍNDICE ESCALONADO	ÍNDICE GRADUAL
Dispersión	20 ns/Km.	50 ps/Km.

**Tabla 2.2** Valores típicos de la dispersión multimodal.

El ancho de banda de la fibra (a los 3 dB ópticos) está relacionado con la dispersión mediante la ecuación 3.14.

$$f_{3dB} = \frac{0.44}{\Delta t_{\text{multimodo}}}$$

Si se consideran los valores típicos mostrados en la tabla 3.2, se obtienen los siguientes anchos de banda.

$$f_{3dB} \text{ (índice escalonado)} = 20 \text{ MHz/Km.}$$

$$f_{3dB} \text{ (índice gradual)} = 9000 \text{ MHz/Km.}$$

En fibras multimodo de índice gradual la dispersión multimodal domina en enlaces de cortas distancias (2 a 5 Km.), pero para enlaces largos, la dispersión del material es dominante. La dispersión cromática también es función de la longitud de onda alrededor de la cual está centrado el espectro. Las fibras ópticas monomodo tiene una dispersión igual a cero a la longitud de onda  $\lambda_0$  (aproximadamente 1.31  $\mu\text{m}$ .) También en la Fig. 3.24 se ilustra el ancho de banda por km. como función del ancho espectral del rayo; Se observa que si se usan LED como fuente óptica, los máximos anchos de banda son del orden de 5 GHz/Km., y si se emplean diodos láser, este ancho de banda puede crecer hasta 4 ordenes de magnitud ( $5 \times 10^4$  GHz/km.).

La atenuación introducida por la fibra óptica es mínima en el intervalo 1.5 - 1.6  $\mu\text{m}$ ., pero la dispersión cromática en este intervalo es diferente de cero. Existen dos técnicas para incrementar el ancho de banda: la primera consiste en crear diodos láser de alta coherencia; la segunda consiste en una construcción especial de la fibra tal que el punto de dispersión cero se recorra a la región de 1.5 - 1.6  $\mu\text{m}$ ., o se aplane en la región de 1.3 - 1.6  $\mu\text{m}$ .

La construcción especial de la fibra consiste en variar, con una ley determinada, el índice de refracción del núcleo. Por ejemplo para desplazar el punto de cero dispersión a la región de 1.5  $\mu\text{m}$ ., y que se mantenga baja la atenuación se usa un perfil triangular del índice de refracción del núcleo, tal como se ilustra en la fig. 2.5a. Si se desea aplanar la característica de la dispersión como función de la longitud de onda en la región 1.3 - 1.6  $\mu\text{m}$ ., se suele emplear un perfil fraccionado, como se ilustra en la fig. 2.5b.

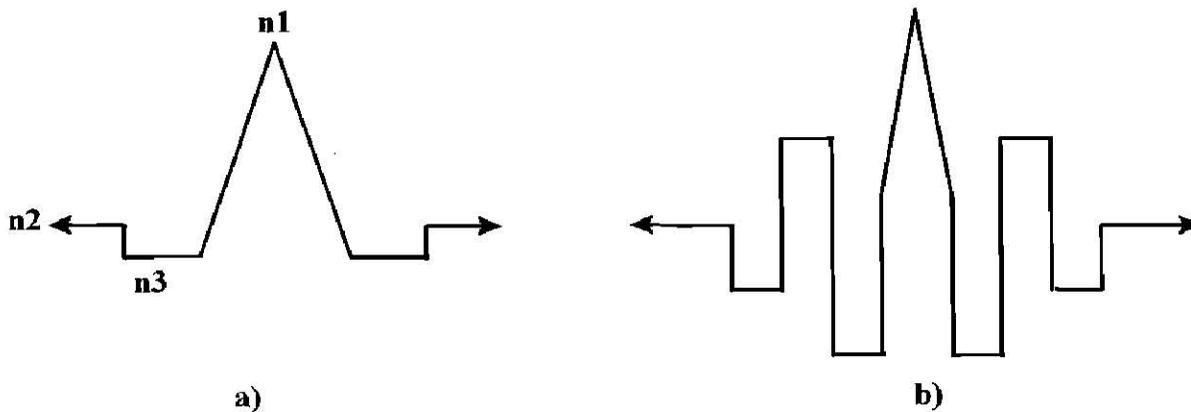


Fig. 2.5 Perfil de índices de refracción del núcleo para desplazar (a) o aplanar la característica de dispersión - longitud de onda.

## PÉRDIDAS EN LAS FIBRAS ÓPTICAS (ATENUACIÓN)

En la evolución de las fibras ópticas, la atenuación siempre ha representado un reto a vencer para obtener una transmisión de señal. Las pérdidas de las fibras ópticas se resumen en dos categorías: absorción y dispersión.

**Pérdidas por absorción.**- La absorción del material resulta de la excitación molecular electrónica de las partículas de impurezas dentro de la fibra cuya longitud de onda iguala a la frecuencia resonante de un cubo molecular de impureza, la molécula vibrará; la energía requerida para causar esta vibración se toma de la luz y de esta manera pierde señal óptica.

**Pérdidas por dispersión.**- Cualquier cambio en el índice refractivo del material causará atenuación en la dirección de los rayos de luz, esta es la causa básica de la dispersión en el material (anteriormente se consideraban condiciones ideales), esto es, si manteníamos que el núcleo de la fibra tuviera un índice de refracción constante, sin embargo durante la fabricación de la fibra las variaciones en el índice refractivo son inevitables, y esta variación da lugar a alguna dispersión de los rayos de luz. Este efecto también es conocido como "Raleigh Scattering" y es inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir, entre mas corta sea la longitud de onda, mas grande es el efecto de la dispersión del material.

## CAP. 3 CONECTORES Y EMPALMES

### INTRODUCCIÓN

La interconexión y el acoplamiento de fibras ópticas con diferentes dispositivos tales como fuentes de luz, y detectores, requieren de especial cuidado, ya que en una instalación se desea reducir al mínimo las pérdidas causadas por uniones de fibras ópticas necesarias en el sistema. Las uniones de las fibras ópticas pueden ser fijas o temporales, en la primera la unión se lleva a cabo por un empalme permanente y en la segunda se utilizan conectores que pueden ser removibles.

El tipo de unión que se elija dependerá de las necesidades de la instalación, por ejemplo, si se requiere de una unión permanente de tramos largos de fibras ópticas con bajas atenuaciones, se hace un empalme permanente; por otra parte, cuando se necesita instalar o retirar una fibra fácil y rápidamente, se emplean los conectores. El incremento de las pérdidas de un enlace es el factor más importante que introduce cualquier unión de fibras ópticas, por lo cual deben considerarse sus causas y la magnitud de sus efectos.

### CONECTORES

Existe un conjunto de diferentes conectores tanto para una fibra monomodo como para una multimodo, entre los más usados están los bicónicos, de abrazadera de precisión, de bolas, de lentes, de abrazadera, de plástico, etc., pero en base a sus principios de diseño se pueden dividir en dos tipos:

- De acercamiento mecánico de precisión en los extremos.
- De acercamiento óptico de las fibras a unir.

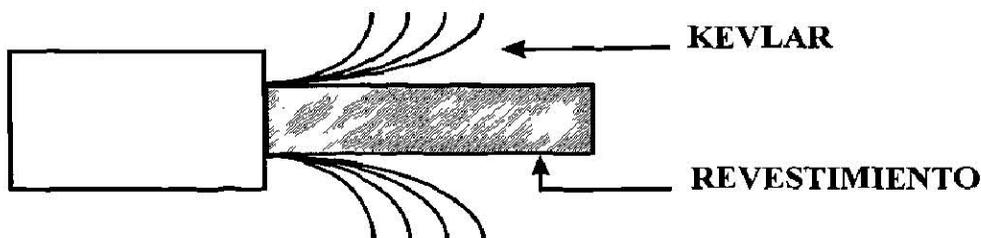
En el primer caso se utilizan estructuras que requieren de precisión lateral, azimutal y longitudinal para lograr el alineamiento requerido por la fibra.

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

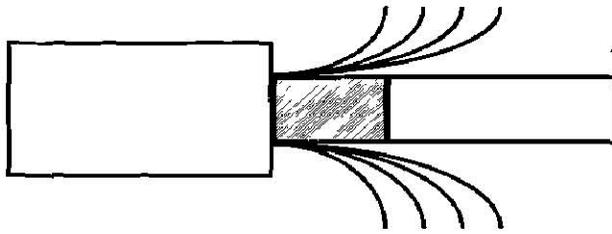
Los conectores más utilizados son los de acercamiento mecánico y en este tipo se encuentran muchas variedades que combinan costos, pérdidas ópticas, durabilidad, etc.

### PROCESO DE CONECTORIZACIÓN

- 1) Preparar la fibra.
- 2) Cortar la cubierta externa.



3) Cortar el buffer primario junto con el kevlar.



**FIBRA (NÚCLEO)**

- 4) Colocar resina epóxidica dentro del conector.
- 5) Colocar el conector hasta que tope en el buffer primario.
- 6) Calentar el conector para secar la resina epóxidica.
- 7) Pulir la terminal del conector.

Conector	Tipo	Fibra	Pérdidas	Colocación
Abrazadera de alta precisión	<p>Fibra      Abrazadera de alta precisión</p>	IG	0.1 dB	En el lugar
		M	0.3 dB	
De lentes	<p>Fibra      Lente</p>	IG	0.8 dB	Fábrica
Bicónico	<p>Fibra      Cono</p>	IG	0.2 dB	En el lugar
		M	0.3 dB	
Bolas	<p>Fibra      Bolas</p>	IG	0.7 dB	En el lugar

Tabla 3.1 Atenuaciones típicas introducidas por diferentes conectores.

## PÉRDIDAS EN LOS CONECTORES

Las atenuaciones típicas introducidas por diferentes conectores a las fibras multimodo (IG) y monomodo (MM) se ilustran en la tabla 4.1.

# PÉRDIDAS EN LOS EMPALMES

Por las diversas causas que son provocadas, las pérdidas en las uniones con fibras ópticas pueden dividirse en extrínsecas e intrínsecas. Las pérdidas extrínsecas son causadas por desalineamiento mecánico en la unión de las fibras.

Este desalineamiento causa pérdidas de radiación ya que el cono de aceptación de la fibra emisora, compagina con el cono de aceptación de la fibra receptora. Existen tres tipos principales de desalineamiento:

1. **Desplazamiento o falla axial.-** Donde los ejes de la fibra no están colineales, sino que están separados paralelamente por una distancia determinada.
2. **Desalineamiento o falla angular.-** Esta sucede cuando los ejes de la fibra forman un ángulo y las caras de los extremos deben estar preparados.
3. **Separación longitudinal.-** La cual ocurre cuando la fibra óptica, al unirse esta sobre un mismo eje, pero tiene un espacio entre las caras de los extremos.

Las pérdidas intrínsecas son ocasionadas por variaciones de la geometría de la fibra y sus características de diseño. Estas pérdidas tienen también un efecto importante en las pérdidas totales del sistema. Los parámetros de variación de la geometría son:

- Diámetro del núcleo.
- Elipticidad del núcleo.
- Apertura numérica.
- Perfil del índice de refracción.
- Concentricidad del núcleo y el revestimiento.

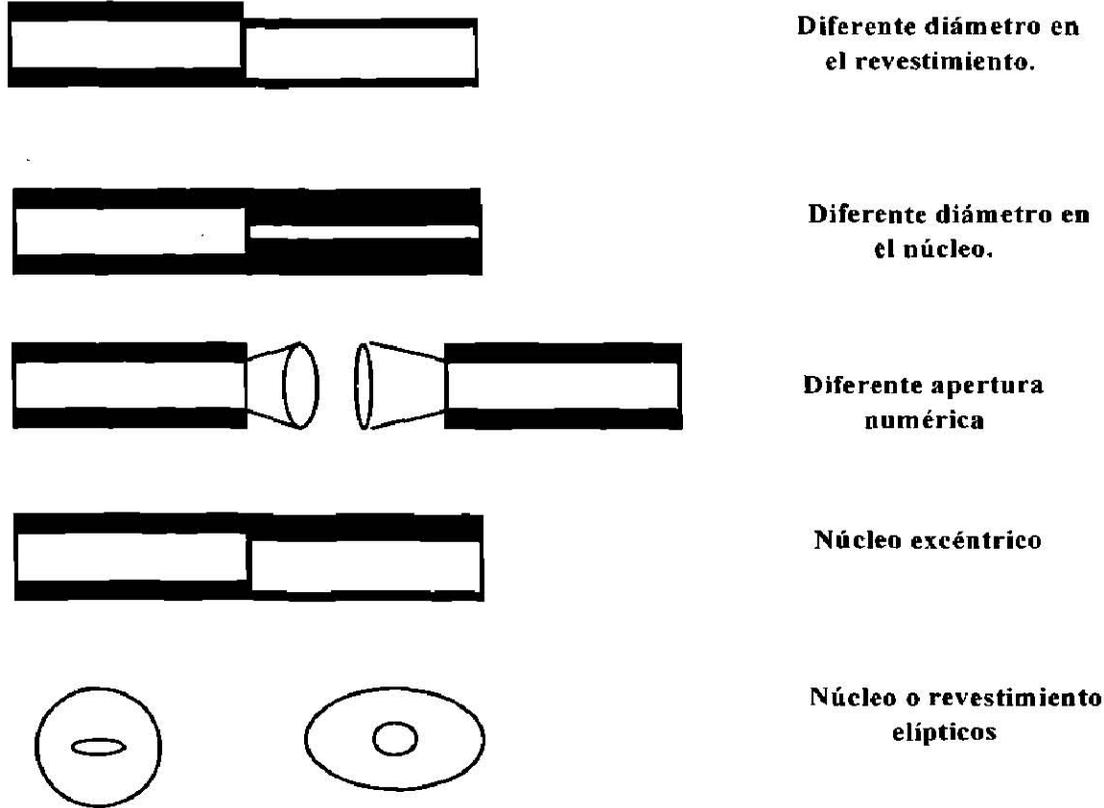


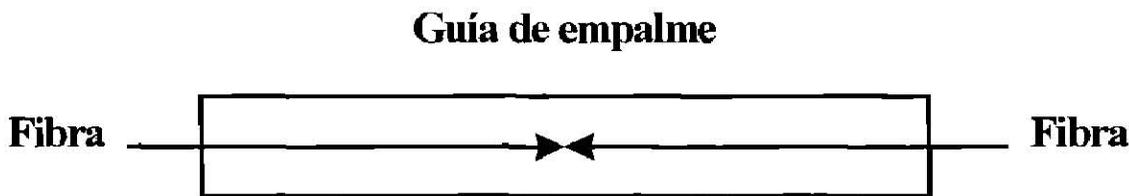
Fig. 3.1 Posibles pérdidas debido a propiedades intrínsecas de la fibras ópticas.

De estos parámetros, los que generan mayores pérdidas son las variaciones del diámetro del núcleo, sobre todo cuando la fibra transmisora tiene un mayor tamaño que la fibra receptora, los demás tipos de pérdidas son causados durante el proceso de fabricación de la fibra y la forma de disminuirlas es mediante la utilización de fibras ópticas de mas alta calidad. El siguiente diagrama muestra las posibles pérdidas causadas por propiedades intrínsecas de las fibras ópticas. Las dos técnicas básicas par realizar empalmes son:

- Mecánicos.
- Por fusión.

### **Empalmes mecánicos (elastoméricos).**

Cuando se tienen enlaces de corta distancia donde se pueden tolerar pérdidas considerables, se utilizan empalmes mecánicos en los cuales las fibras ópticas son unidas por medios mecánicos, como ranuras en forma de varillas (se puede agregar una substancia epóxica par adherir las fibras y además actuar como acoplador óptico). La siguiente figura nos muestra un empalme de este tipo:



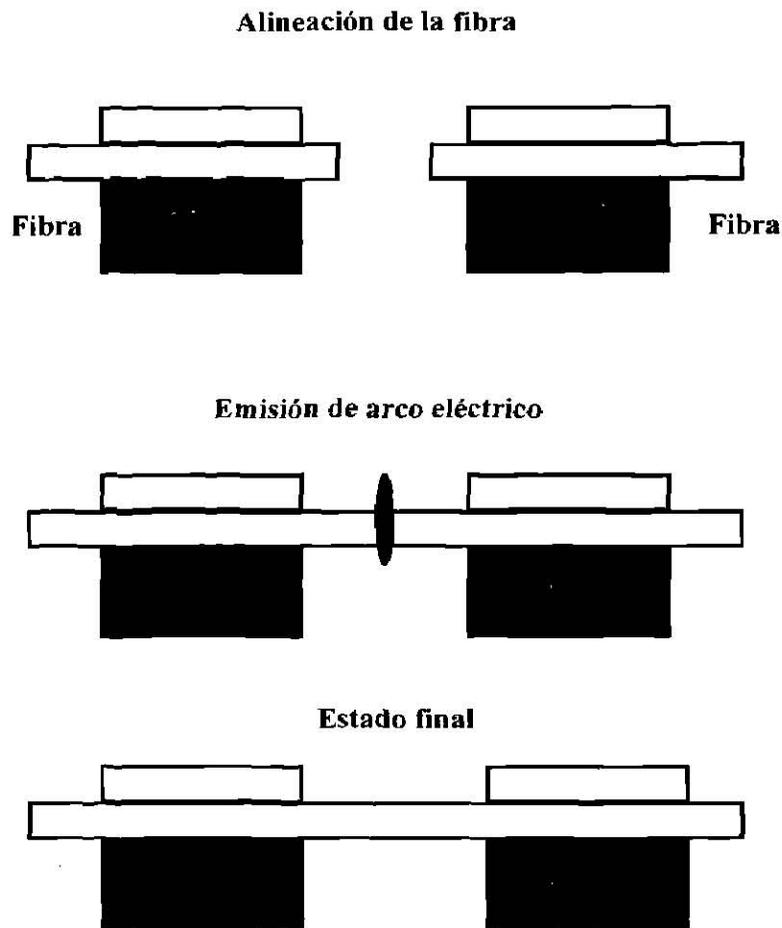
**Fig. 3.2 Empalme mecánico (elastomérico).**

Algunas de las características de este tipo de empalme son:

- Las fibras se manejan con herramienta manual.
- Ambas fibras se unen en una guía de empalme.
- El epóxico no es dañino.
- Se tiene un kit manual.
- No es muy caro.
- Trabaja con fibras multimodo.
- Las pérdidas son del orden de 0.2 dB.

## Empalme por fusión

El empalme por fusión es el método más utilizado y consiste en aplicar calor en una zona específica entre las fibras a unir, para suavizarlas y posteriormente fusionarlas. Las fibras ópticas deben prepararse en los extremos para que estén planas y perpendiculares al eje, limpiando la fibra de grasa y polvo. En la siguiente figura se muestran los pasos para realizar este tipo de empalme:



**Fig. 3.3** Pasos para realizar el empalme por fusión.

En la tabla 3.4 se muestran algunas pérdidas para fibras, empalmes, conectores y pérdidas intrínsecas.

**ATENUACIÓN (DB / KM.)**

TAMAÑO	830 nm.	1300 nm.
100 / 140 μm.	6	3
62.5 / 125 μm.	4	2
50 / 125 μm.	3	1.5

**EMPALMES ( PÉRDIDAS )**

<b>0.2 dB PARA EMPALME POR</b>
<b>0.02 dB PARA EMPALME POR FUSIÓN.</b>

**CONECTORES ( PÉRDIDAS )**

	MÁX.	MÍN.
<b>dB / CONECTOR</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>

**FIBRA**



**PÉRDIDAS INTRÍNSECAS ( DB )**

TAMAÑO DE LA FIBRA	100 / 140 μm.	62.5 / 125 μm.	50 / 125 μm.
100 / 140 μm.	0	-4	-6
62.5 / 125 μm.	0	0	0
50 / 125 μm.	0	0	0

**Tabla 3.4 Pérdidas para fibras, empalmes, conectores y pérdidas intrínsecas.**

## CAP. 4.- SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

### INTRODUCCIÓN.

Un sistema de comunicaciones es aquel cuya función es realizar tanto la transmisión como la recepción de un mensaje de un punto a otro, sin importar que este último sea local o remoto. Un diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto se muestra en la fig. 1.1.

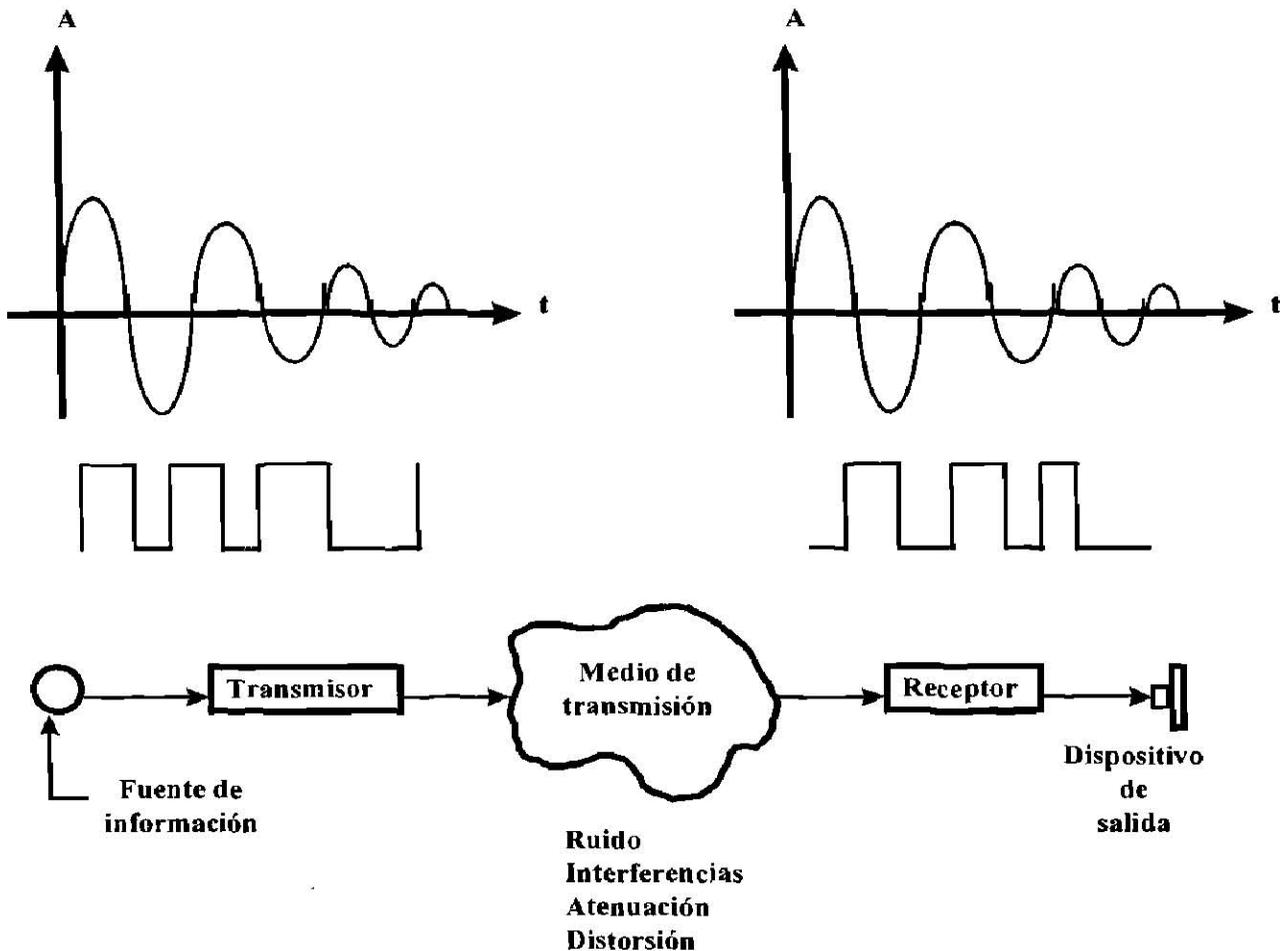


Fig. 4.1 Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto.

Como se puede observar en el diagrama a bloques anterior, en el transmisor se genera toda la información que se desea comunicar y se le da una forma adecuada para poder ser enviada a través del medio de transmisión. Dentro del medio de transmisión además se generan señales “no deseadas”, ya que alteran la información original y pueden incluso, cambiarla por completo si no se toman las medidas de seguridad adecuadas.

Estas señales pueden ser ruido, distorsión, atenuación, interferencias electromagnéticas, etc. Dichas señales pueden ser generadas por diferentes fuentes, tales como el mismo equipo electrónico, el medio de transmisión, o incluso el medio ambiente.

La fuente de información puede ser cualquier transductor que transforme la manifestación de un fenómeno físico en oscilaciones de voltaje y corriente. Las señales que contienen la información pueden ser analógicas, como las provenientes de un termómetro, de un reloj de manecillas, etc. o pueden ser digitales, como las provenientes de una computadora. En general todos los transductores generan señales analógicas, pero estas pueden digitalizarse antes de ser transmitidas a través del medio de comunicación.

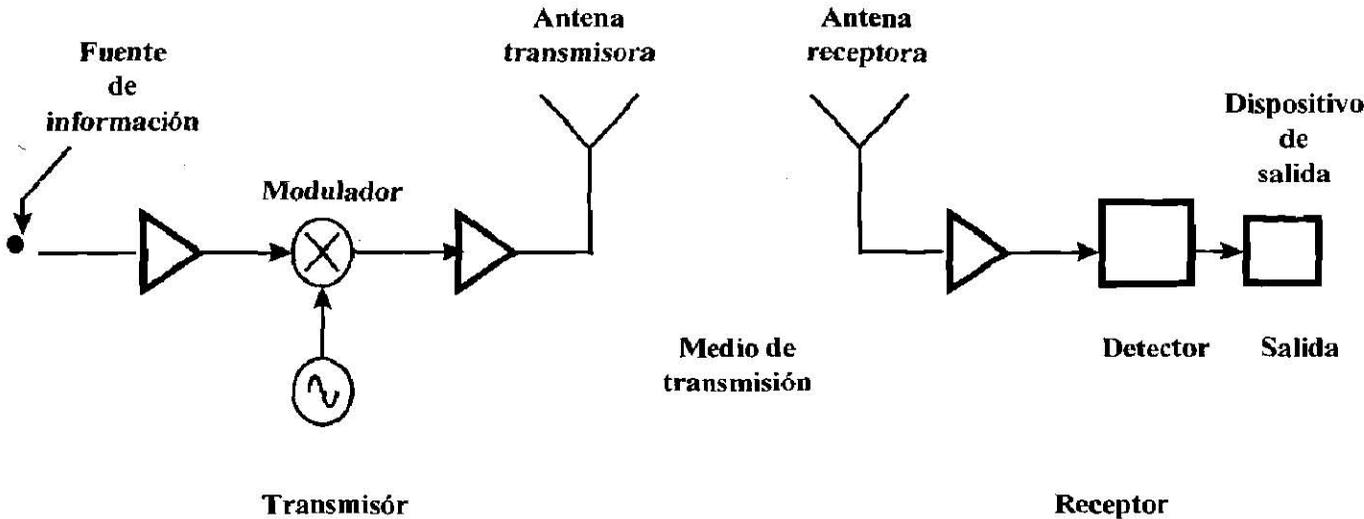
Los sistemas de comunicación se pueden clasificar de diferente forma, dependiendo del parámetro de comparación. Por ejemplo, los podemos clasificar por la forma en que envían el mensaje; ya sea de manera digital o analógica, y puede ser en banda base o a través de una portadora. Otro parámetro muy importante para clasificar los sistemas de comunicaciones es el medio de transmisión que emplean; dependiendo del medio o canal de transmisión empleado, un sistema puede poseer una o varias características de peculiaridad que lo hace insustituible con respecto a otros sistemas que emplean diferentes medios de comunicación.

**CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DE ACUERDO A SU MEDIO DE TRANSMISIÓN**

De acuerdo al medio de transmisión los sistemas de comunicación se pueden clasificar en: sistemas de radiocomunicación, sistemas por cable metálico y sistemas por fibras ópticas.

**Sistemas de radiocomunicación.**- Todos los sistemas de radiocomunicación emplean el espacio libre como medio de transmisión. La información viaja en forma de ondas electromagnéticas no guiadas desde el transmisor hasta el receptor. Para que el transmisor radie energía electromagnética al espacio circunvecino es necesario emplear un transductor, cuya función será la de transformar ondas de voltaje y corriente u ondas electromagnéticas guiadas en ondas electromagnéticas no guiadas; este transductor es la antena transmisora, que dependiendo de la frecuencia y la aplicación del sistema puede radiar energía de igual forma en todas las direcciones (antena omnidireccional) o en una dirección en particular (antena unidireccional).

En el receptor también se tiene que emplear un transductor que transforme ondas electromagnéticas no guiadas en ondas de voltaje y corriente o en ondas electromagnéticas guiadas; este transductor es la antena receptora que dependiendo de la frecuencia y de la aplicación del sistema puede recibir señales provenientes de todas direcciones de igual manera, o de una sola dirección preferida. Un sistema de radiocomunicación punto a punto se ilustra en la fig. 4.2.



**Fig. 4.2 Diagrama a bloques de un sistema de radiocomunicación punto a punto.**

El hecho de que los sistemas de radiocomunicación no empleen un medio físico para la transferencia de energía desde el transmisor hasta el receptor, hacen que estos posean una serie de características particulares de ellos y que en ciertas aplicaciones sean insustituibles, y que en otras sea mas conveniente emplear sistemas con otros medios de transmisión. Las principales ventajas y limitaciones de los sistemas de radiocomunicación son:

## VENTAJAS

- Facilidad de comunicaciones móviles.
- Facilidad de reconfiguración.
- Facilidad de comunicación multipunto.
- Facilidad de establecer enlaces en áreas de difícil acceso o sin infraestructura.
- Económicos.
- Menor tiempo de instalación.

## LIMITACIONES

- Susceptibilidad a interferencias electromagnéticas.
- Espectro electromagnético limitado.
- Poca privacidad.
- Dependencia de las condiciones ambientales.

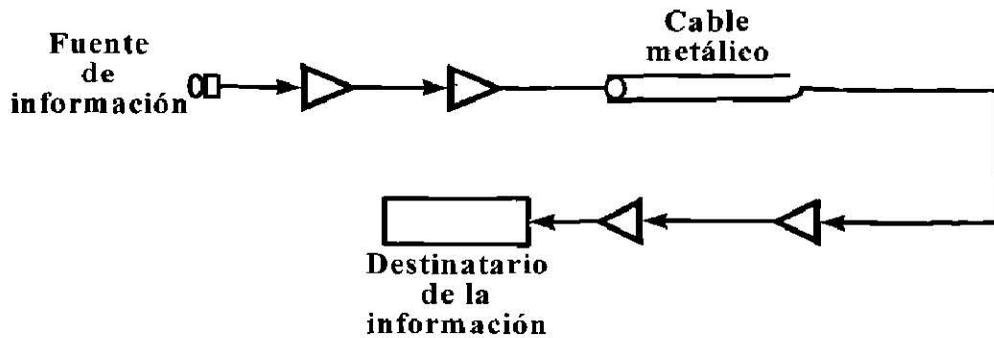
Es importante también mencionar que en este tipo de sistemas es necesario, en muchas ocasiones, la utilización de estaciones repetidoras, las cuales incrementarán la distancia entre transmisor y receptor, ya que estas estaciones regeneran la señal y la retransmiten para poder alcanzar su destino final. Existe otro tipo de sistemas de radiocomunicación muy importante en la actualidad: los sistemas satelitales. Básicamente estos sistemas operan bajo el mismo principio que cualquier sistema de radiocomunicación, la única diferencia es que en estos sistemas siempre existe un repetidor (satélite), el cual se encuentra en una órbita geoestacionaria y cuyas frecuencias de operación son del orden de microondas.

## SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR CABLE METÁLICO.

Los sistemas de comunicación por cable metálico necesitan de un medio físico como canal de transmisión, y este debe ser un conductor de la electricidad. Esta propiedad le da una serie de características muy importantes a estos sistemas. Un diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto que emplea como medio de transmisión conductores eléctricos (par de alambres, cable coaxial, guía de onda) se muestra en la fig. 4.3. El hecho de que estos sistemas empleen un medio físico que es conductor de la electricidad le da una serie de características particulares, las más sobresalientes son:

### Necesidad de un medio físico

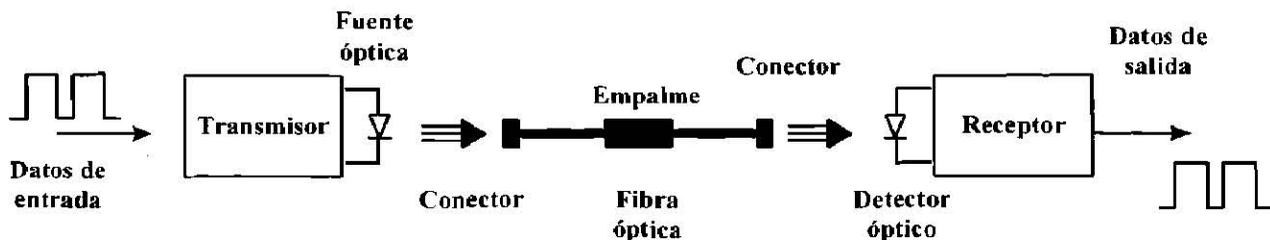
- El medio de transmisión cuesta.
- Se emplea tiempo en instalar el medio de comunicación.
- Menor facilidad de reconfigurar el sistema.
- Comunicación móvil solo en áreas pequeñas.
- Dificultad de comunicación punto-multipunto.
- Menor susceptibilidad a interferencias electromagnéticas.
- Facilidad de conducir energía eléctrica.
- Dificultad de emplearlos en medios explosivos y corrosivos.
- Problemas de diafonía (eco).
- No existen límites físicos para la capacidad de transportar información.
- Problemas de bucles de tierra.
- Mayor privacidad.
- Sensibilidad al medio ambiente.



**Fig. 4.3 Enlace punto a punto de un sistema por cable metálico.**

### FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN

Los sistemas de comunicación por fibra óptica emplean también un medio físico dialéctrico como canal de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de rayos de luz, es decir, en ondas electromagnéticas guiadas; la única diferencia con las ondas electromagnéticas de radio es la frecuencia de operación. Como en los sistemas de radiocomunicación, estos sistemas requieren de transductores para el acondicionamiento de la señal útil a transmitirse y recibirse. En el transmisor se requiere de un transductor de ondas de voltaje y corriente en ondas luminosas y en el receptor se requiere de un transductor de ondas luminosas en ondas de voltaje y corriente. Un diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones por fibras ópticas donde se incluyen los elementos básicos de estos sistemas se muestra en la fig. 4.4.



**Fig. 4.4 Enlace de comunicaciones punto a punto por fibras ópticas.**

Algunas de las principales ventajas y limitaciones de los sistemas de comunicación por fibras ópticas con respecto a los sistemas de radiocomunicación y a los sistemas de comunicación por cable metálico, se deben a las características inherentes al medio de transmisión, que es la fibra óptica.

# CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRAS ÓPTICAS

## CARACTERÍSTICAS

## VENTAJAS

Eliminación de las interferencias electromagnéticas.

- Seguridad de alta calidad de transmisión
- Reducción de costos de protección contra el ruido
- Localización cercana a líneas de alta tensión.
- Eliminación de los problemas de bucle detierra
- Travesía segura en zonas peligrosas
- Seguridad contra descargas eléctricas

Aislamiento térmico

Pérdidas pequeñas

- Espaciamiento grande entre repetidores
- Gran confiabilidad gracias a la mínima cantidad de repetidores
- Menor mantenimiento

Gran ancho de banda

- Gran capacidad de transmisión
- Eliminación de igualadores
- Atenuación independiente del ancho de banda del mensaje transmitido.

Diámetro y peso pequeños

- Reducción de los costos de instalación y reparación.

Estabilidad en medios severos

- Alta confiabilidad de la transmisión.
- Reducción de la protección contra el medio ambiente.

### Otras características adicionales:

- 1.- Alta privacidad de la transmisión.
- 2.- Sensibilidad limitada por el ruido cuántico.
- 3.- Niveles pequeños de potencia eléctrica.
- 4.- Se facilita la movilidad en áreas pequeñas (gracias a su peso y tamaño comparado con los conductores eléctricos).
- 5.- Las derivaciones de la fibra óptica son mas complicadas y producen mayores atenuaciones en comparación con las derivaciones con cable eléctrico.
- 6.- Gran abundancia de la materia prima (SiO<sub>2</sub>).
- 7.- Interferencias mínimas entre fibras.
- 8.- Cableado de muchas fibras en un solo ducto.
- 9.- Mayor economía para enlaces de 2 km. y velocidades mayores de 2 MB/s.

### Principales limitaciones

- 1.- Como en el caso de los enlaces por cable eléctrico, se requiere de un medio físico.
- 2.- Movilidad reducida en comparación con los sistemas de radiocomunicación.
- 3.- Mayor dificultad en comunicaciones multipunto; las derivaciones pasivas introducen grandes niveles de atenuación (idealmente 3 dB, para derivaciones 1:1)
- 4.- Las fuentes ópticas son relativamente de alta no linealidad.

## CAP. 5 FUENTES Y TRANSMISORES ÓPTICOS

### INTRODUCCIÓN.

Entre las diferentes fuentes ópticas que existen, los diodos láser (LD) son los únicos que satisfacen todos los requerimientos exigidos por los sistemas de telecomunicaciones. Actualmente, la instalación de sistemas por fibras ópticas se ha difundido ampliamente debido principalmente a dos factores: enorme capacidad de transmitir información un costo relativamente bajo. Estos logros han sido posibles gracias a los grandes avances tecnológicos: desarrollo de fibras de vidrio con bajas pérdidas y grandes anchos de banda; desarrollo de dispositivos ópticos de alta calidad y confiabilidad (fuentes ópticas- Led, LD; detectores ópticos- PIN, APD). Para describir eficientemente el principio de funcionamiento de las fuentes ópticas se usará la característica de la partícula de luz.

### PRINCIPIO DE OPERACION EN LAS FUENTES OPTICAS

La energía (E) de un fotón puede encontrarse como:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

donde:

h es la constante de Plank.

v es la frecuencia del fotón.

c es la velocidad de la luz en el medio.

$\lambda$  es la longitud de onda.

En un semiconductor un electrón puede pasar de la banda de conducción a la banda de valencia o viceversa. La energía absorbida o liberada por este es igual a:

$$E = E_c - E_v$$

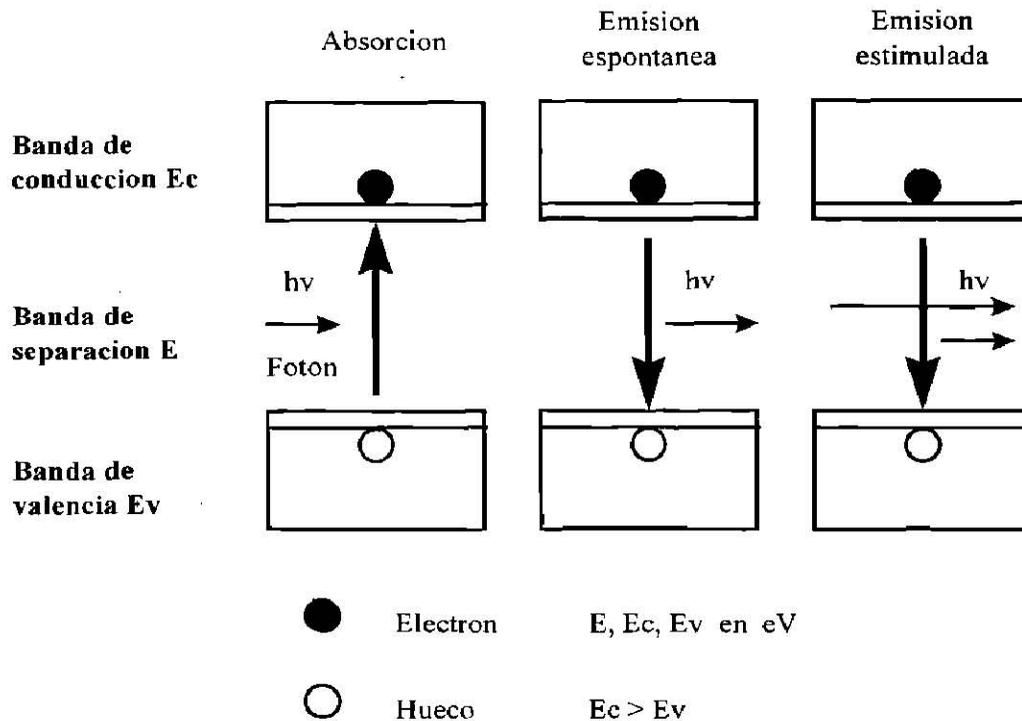
donde:

$E_c$  es la energía de un electrón cuando este se encuentra en la banda de conducción.

$E_v$  es la energía de un electrón cuando este se encuentra en la banda de valencia.

Una representación de la transición de un electrón entre las bandas de conducción y de valencia se muestra en la fig. 5.1. En la transición de un electrón entre las bandas de conducción y de valencia, este puede absorber o liberar energía.

Esta energía determinada por la ecuación 5.2 puede liberarse en forma de fotones. Para que esto suceda la transición de la banda de conducción a la banda de valencia debe ser directa, es decir, el electrón no debe cambiar su momento. Cuando el electrón cambia su momento se dice que tiene una transición indirecta, y la energía no se libera en forma de fotones sino en forma de calor. Una ilustración de los electrones se muestra en la fig. 5.2.



**Fig. 5.1 Interacción electrón-fotón en uniones semiconductoras.**

Cuando la transición es directa, la longitud de onda del fotón emitido es:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1.2398}{E(\text{eV})}, \mu\text{m.}$$

La energía E es una característica del material y se puede cambiar como función del tipo de contaminante empleado en el semiconductor. Una lista de longitudes de onda para diferentes compuestos se da en la tabla 5.1.

El proceso de liberar un fotón puede hacerse de dos maneras: espontánea o estimulada. En la emisión espontánea no existe ningún medio externo que induzca a los electrones a pasar de la banda de conducción a la banda de valencia. En la emisión estimulada un fotón induce a que el electrón pase a su estado de reposo, liberando así, un fotón.

## DIODOS EMISORES DE LUZ

Los diodos emisores de luz (LED) son fuentes de luz con emisión espontánea (no coherente), son diodos semiconductores p-n que para emitir luz se polarizan directamente. Un semiconductor p tiene huecos libres en la banda de valencia y un semiconductor n tiene electrones libres en la banda de conducción, cuando el semiconductor p se une con el semiconductor n, se forma una barrera de potencial como se presenta en la fig. 5.4c.

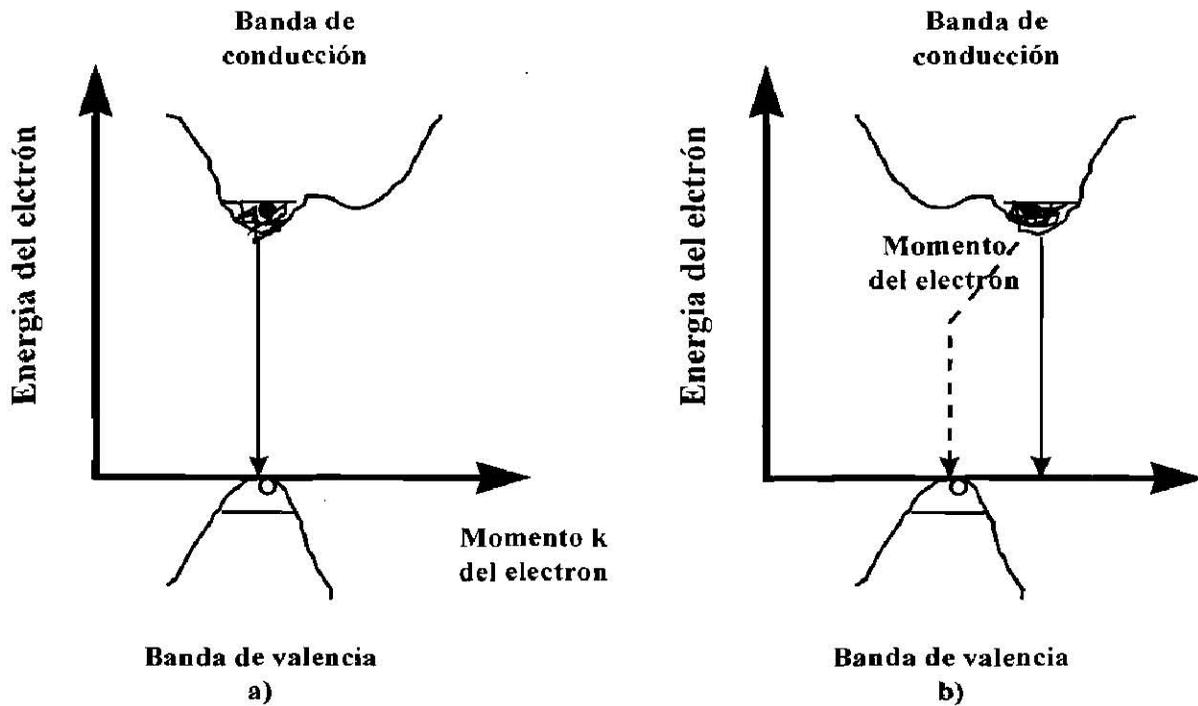


Fig. 5.2 Tipos de transición de electrones de un nivel alto a uno bajo. A) Directa en semiconductor GaAs; b) Indirecta en semiconductores Si o Ge.

COMPUESTO	$\lambda, \mu m$	E (eV)
AlGaAs	0.8 - 0.9	1.4
InGaAs	1.0 - 1.3	1.4 - 1.55
InGaAs	0.9 - 1.7	0.73 - 1.35

Tabla 5.1 Materiales empleados para fuentes ópticas.

En esta condición los electrones no tienen suficiente energía para atravesar la barrera de potencial y llegar al semiconductor n y recombinarse con electrones libres, por lo tanto no existe ningún movimiento de carga.

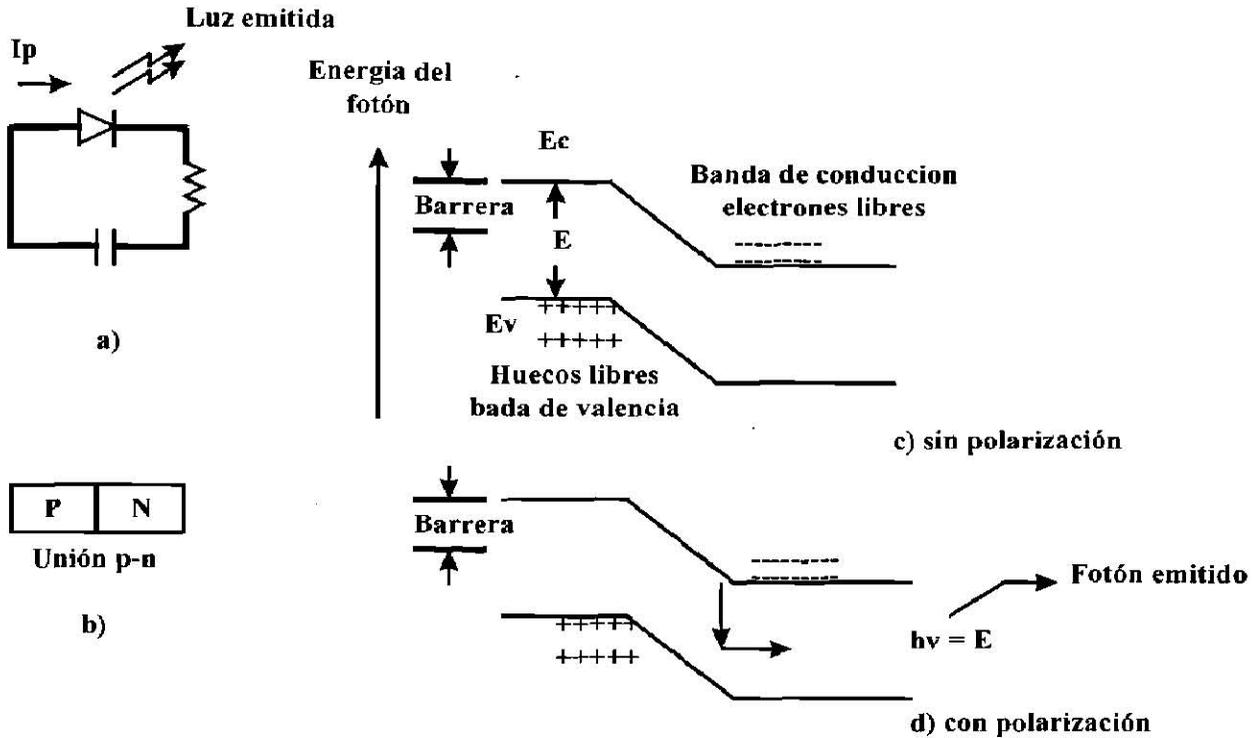


Fig. 5.3 Símbolo y niveles de energía de una unión p-n.

Si se aplica una polarización directa al diodo, la barrera de potencial disminuye elevando la energía potencial en el semiconductor n y disminuyéndola en el semiconductor p. Bajo esta condición los electrones y huecos tienen suficiente energía para atravesar la barrera, los electrones pasarán de la banda de conducción a la de valencia recombinándose con los huecos; si el semiconductor es de transición directa, la energía perdida por los electrones se convertirá en energía óptica en forma de fotones.

Para la fabricación de diodos de alta eficiencia que acoplen suficiente energía, es necesario que la recombinación de electrón-hueco se realice en un área pequeña, y que los fotones emitidos se radien en una dirección específica. Esto se logra confinando a los portadores de carga en una región pequeña con barreras de potencial y confinando a los fotones con perfiles adecuados de índice de refracción.

Los diferentes niveles de energía ( $E = E_c - E_v$ ) crean barreras de potencial tanto para los electrones como para los huecos. Una representación de una doble heterounión se muestra en la fig. 5.4.

Los diodos emisores de luz se clasifican en:

**Diodos emisores de superficie.-** El diseño de este tipo de LED se construye con un área de emisión pequeña (15 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro), sumergido en un material semiconductor con el fin de disipar el calor eficientemente. La separación de la superficie emisora es angosta para minimizar pérdidas por absorción. En este tipo de diodo la radiación es constante y en todas las direcciones, esencialmente isotrópica y con una emisión de  $120^\circ$ .

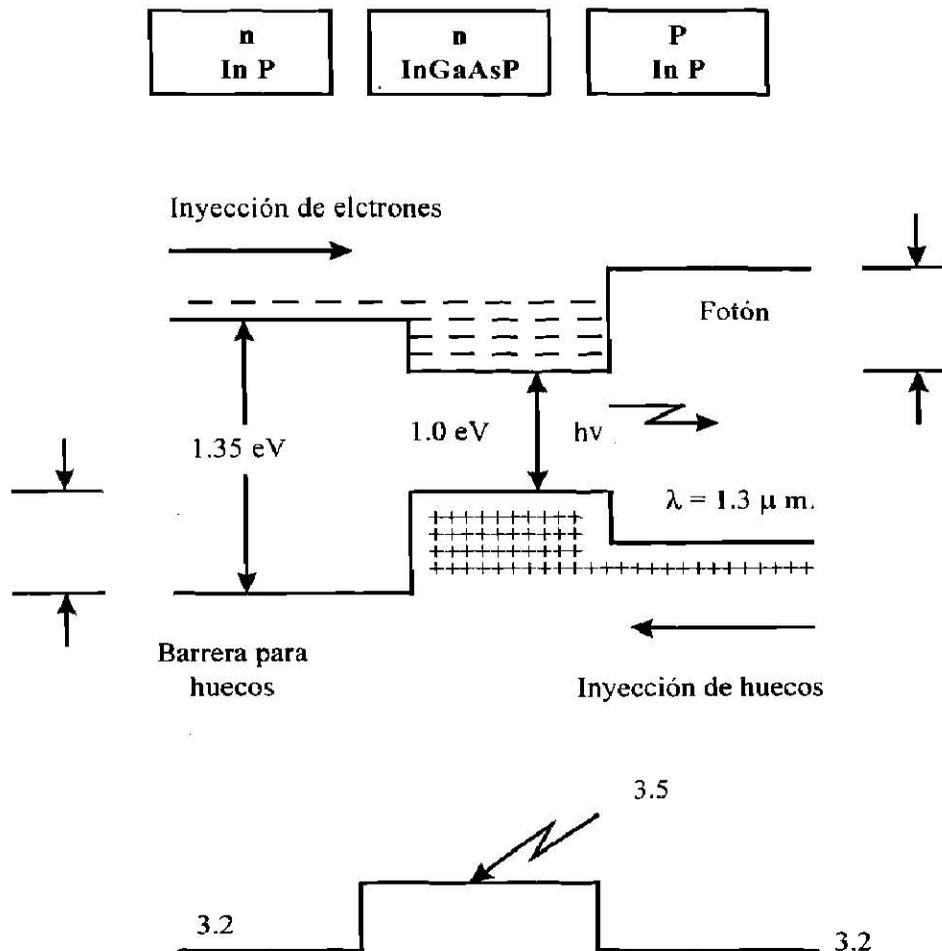


Fig. 5.4 Representación de una doble heterounión.

**Diodo emisor lateral.**- Este tipo de diodo emplea una doble heterounión para confinar a los fotones en una capa angosta; la mayor parte de la radiación es por la capa reflectora, lo cual hace que la radiación efectiva sea muy alta. Este tipo de diodo se usa con mucha eficiencia en una fibra con una apertura numérica pequeña comparada con la superficie emisora.

Una característica de los LED es su salida espectral, la cual se considera un proceso aleatorio gaussiano, la sig. Gráfica nos muestra la intensidad relativa en función de la longitud de onda. Fig. 5.5a.

## CARACTERÍSTICAS DE OPERACION DE LOS LED

La energía luminosa emitida por los LED es proporcional al nivel de corriente de polarización del diodo. Por lo tanto si el nivel de corriente de polarización varía en conformidad con una señal útil, la potencia emitida por el LED será proporcional a la amplitud de la señal. Una representación de las características potencia óptica-corriente de polarización y de la modulación de la potencia óptica con señales digitales y analógicas se muestra en la fig. 5.5.

Los LED son dispositivos muy robustos y no requieren de circuitería de protección, lo anterior redundando en simplicidad y bajo costo de los transmisores. En la fig. 5.6 se muestra un diagrama típico de transmisores comerciales utilizando LED como fuente óptica.

## DIODOS LASER

Los diodos láser (LD) son fuentes de emisión estimulada y contienen dos espejos semirreflejantes para formar una cavidad resonante, la cual sirve para realizar tanto la retroalimentación óptica como la selectividad.

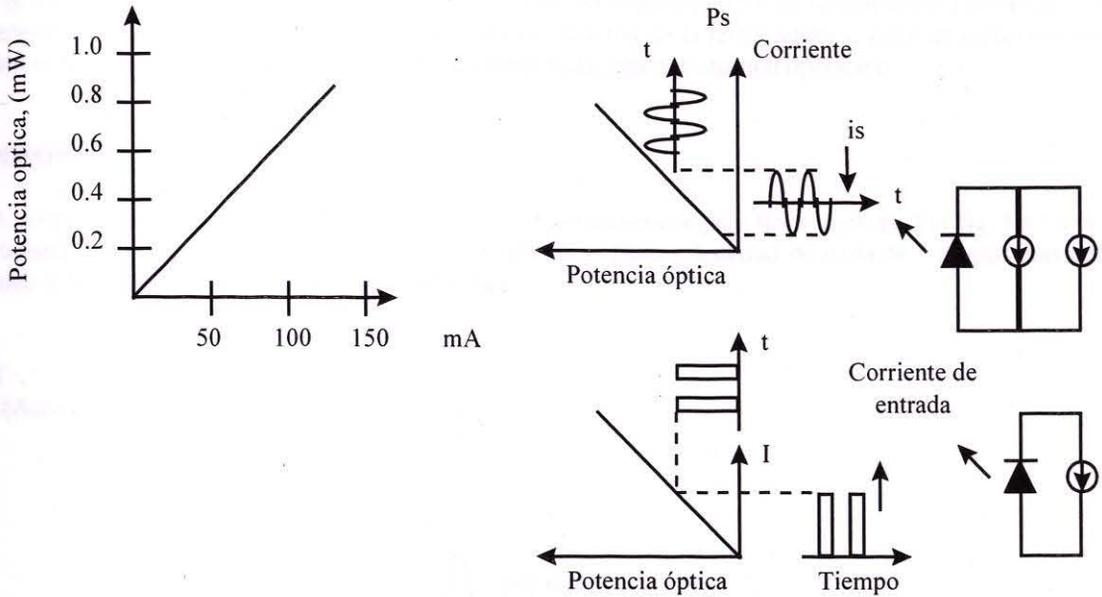


Fig. 5.5 Característica potencia óptica-corriente de polarización de un LED.

La estructura del LD es muy similar a la de un LED. La diferencia fundamental consiste en que la emisión de un LD es siempre de perfil, y sobre este, las superficies tienen características de espejos semirreflejantes. Cuando el diodo se polariza directamente, se inyectan portadores a la zona activa, donde se recombinan emitiendo espontáneamente fotones, tal como se mencionó anteriormente. Si la densidad de corriente es suficientemente alta, existe un gran número de electrones que son estimulados para que emigren al nivel de reposo emitiendo un gran número de fotones, lo cual significa que se tienen altos niveles de ganancia óptica.

Si existen espejos los cuales realicen funciones de retroalimentación, la oscilación láser se alcanzara si el nivel de corriente es lo suficientemente grande para que la ganancia óptica compense las pérdidas. Al nivel de corriente donde se alcanza el equilibrio entre pérdidas y ganancia se denomina corriente de umbral. Si el tamaño longitudinal de la cavidad resonante es varias veces mas grande que la longitud de onda, se obtendrán varios modos longitudinales y el espectro radiado contendrá estos modos longitudinales.

Una comparación de los espectros emitidos por un LED y un LD se muestra en la fig. 5.7. Los LD tienen una corriente de umbral, y a niveles de corriente menores a este, el LD emite luz incoherente como un LED, y a niveles de corriente superiores al umbral, la luz emitida es coherente.

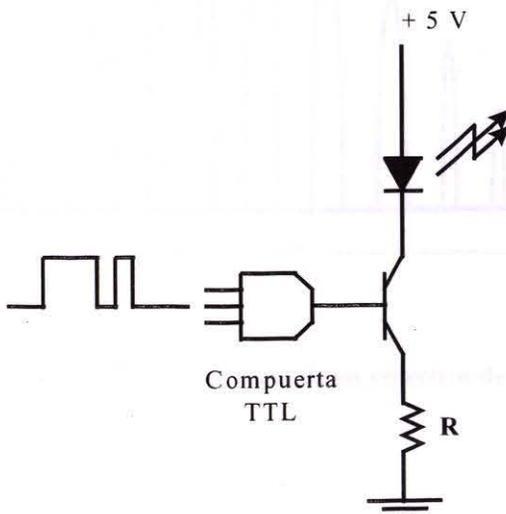


Fig. 5.6 Esquema de un transmisor con LED.

Puesto que las características de los espejos reflejantes son funciones tanto de la temperatura como de la operación, las características potencia óptica-corriente de polarización es función de la temperatura y sufre un cierto envejecimiento, debido tanto en una operación normal como en degradaciones inducidas por una mal operación.

## TRANSMISORES

A continuación se muestra un diagrama a bloques de un transmisor para fibras ópticas. Ver fig. 5.8 En la siguiente tabla se muestra una comparación entre la potencia, tamaño de la fibra y longitud de onda de los tipos mas comunes de acoplamiento a la salida de los transmisores (ver tabla 5.2).

- Pigtail.
- ADM (Active Device Mount).

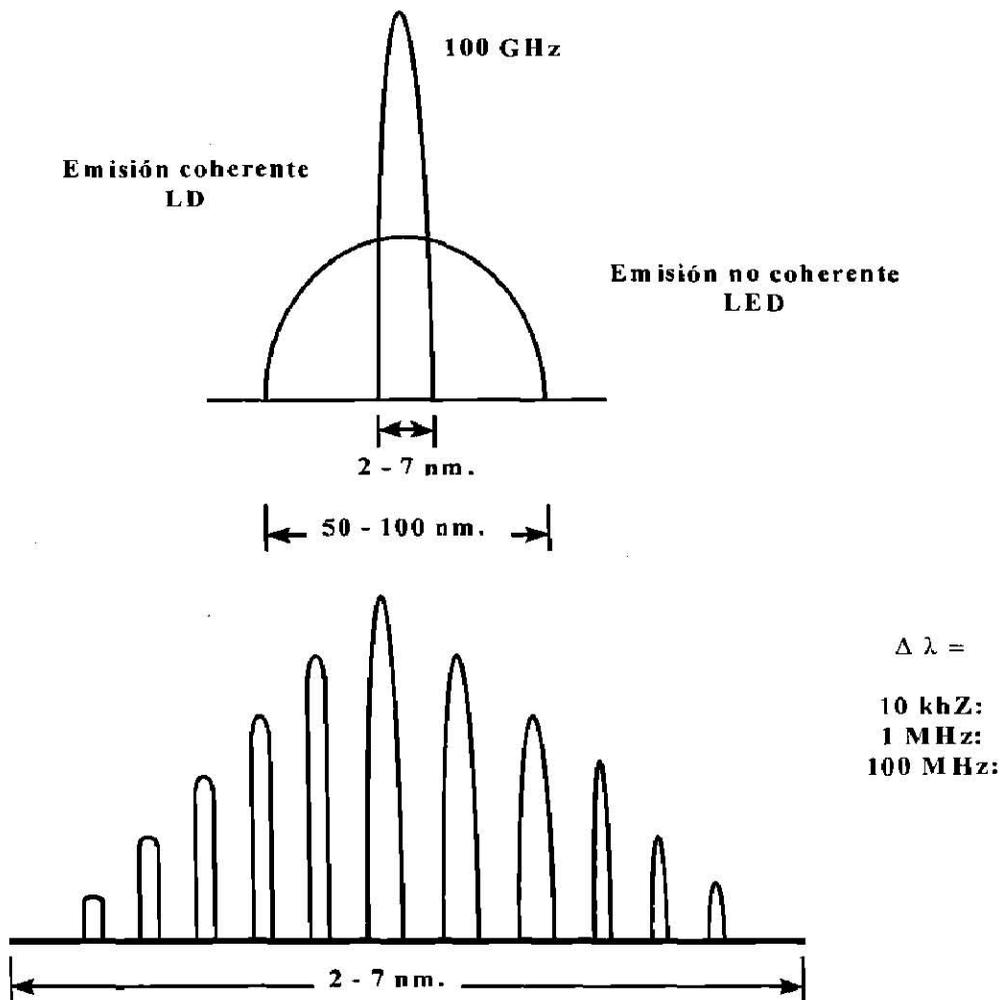
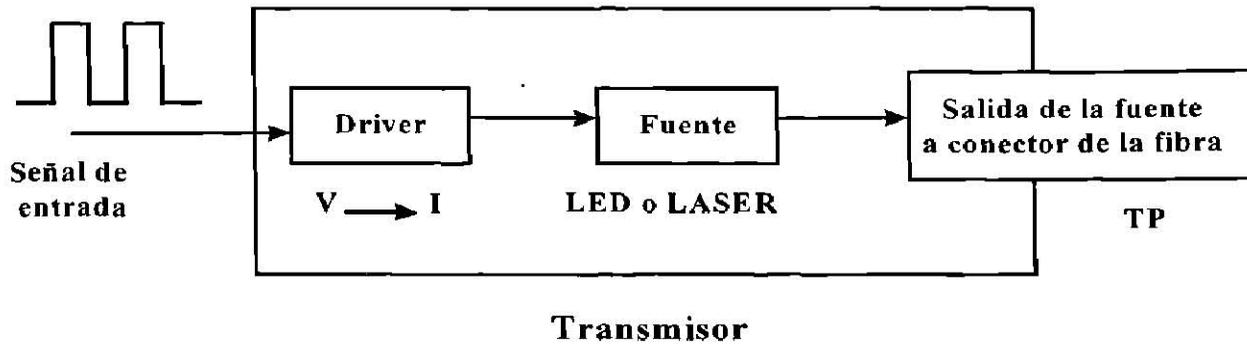


Fig. 5.7 Comparación de los espectros de un LED y un LD.



TP.- Potencia de salida del transmisor

Fig. 5.8 Diagrama a bloques de un transmisor óptico.

PIGTAIL		TAMAÑO DE LA FIBRA		
		100/140 $\mu\text{m.}$	62.5/125 $\mu\text{m.}$	50/125 $\mu\text{m.}$
Lomgitud de onda	830 nm.	TP	-4 dB	-6 dB
	1300 nm.	-10 dB	-14 dB	-16 dB

ADM		TAMAÑO DE LA FIBRA		
		100/140 $\mu\text{m.}$	62.5/125 $\mu\text{m.}$	50/125 $\mu\text{m.}$
Lomgitud de onda	830 nm.	+0.5 dB	TP	-3.5 dB
	1300 nm.	-5.5 dB	-6 dB	-9.5 dB

Tabla 5.2 Acoplamiento mecánico del Pigtail y APD con la fibra óptica.

## CAP. 6 DETECTORES Y RECEPTORES OPTICOS

El propósito del receptor en los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas, es extraer la información contenida en una portadora óptica que incide en el fotodetector. En los sistemas de transmisión analógica, el receptor debe amplificar la salida del fotodetector y después demodularla para obtener la información. En los sistemas de transmisión digital, el receptor debe producir una secuencia de pulsos eléctricos (unos y ceros) que contengan la información del mensaje transmitido.

En la fig. 6.1 se muestra la estructura básica de un receptor para sistemas de telecomunicaciones por fibras ópticas. El fotodetector convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica. La potencia eléctrica se encuentra en banda base, es decir, varía de acuerdo a la modulación y no a la frecuencia óptica. La corriente óptica que proporciona el fotodetector es muy débil (del orden de nA), por lo que debe amplificarse con preamplificadores especiales, diseñados para trabajar con detectores ópticos. La señal amplificada se procesa eléctricamente, ya sea filtrándola, demodulándola o regenerándola.

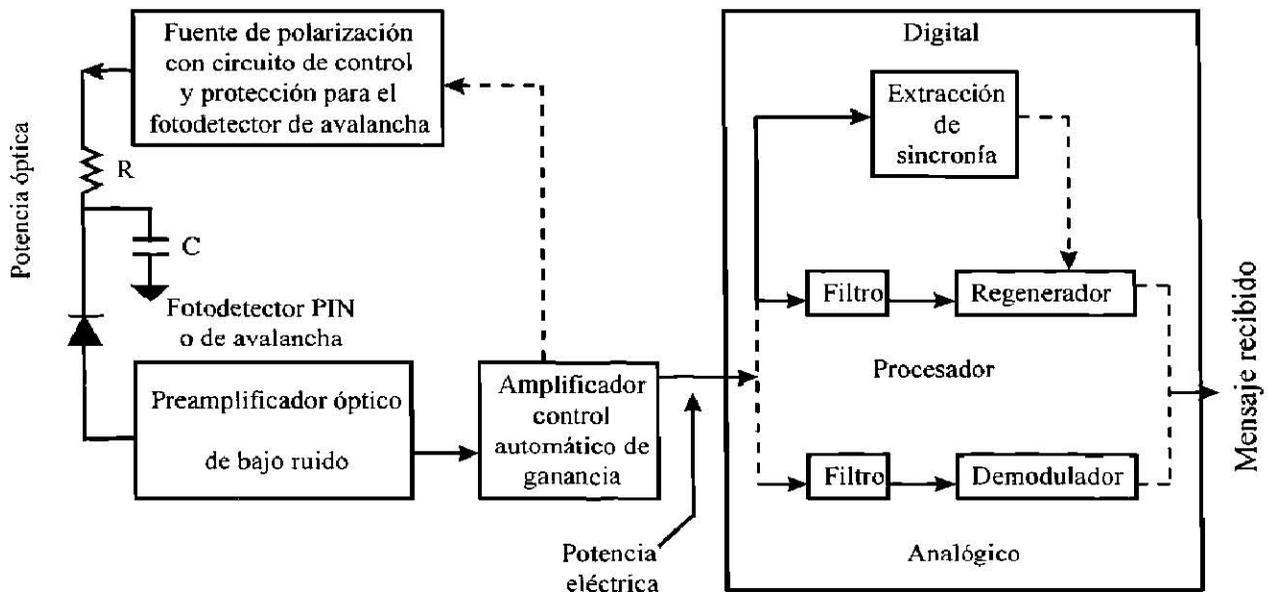


Fig. 6.1 Diagrama a bloques de un receptor óptico.

### FOTODETECTORES

En los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas, el fotodetector es un elemento esencial, por lo que es muy importante que se satisfagan requerimientos muy estrictos en su funcionamiento.

Las características principales que deben tener son:

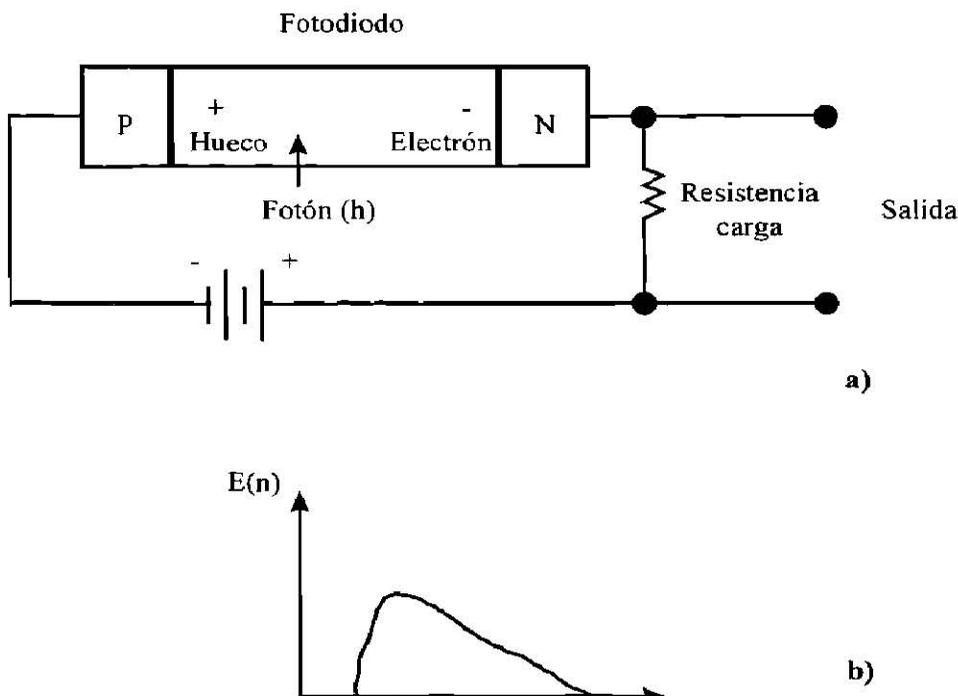
- 1.- Sensibilidad alta a la longitud de onda de operación.
- 2.- Contribución mínima al ruido total del receptor.
- 3.- Gran ancho de banda (respuesta rápida).
- 4.- Características estables respecto al medio ambiente.
- 5.- Dimensiones físicas compatibles con la fibra óptica.

Existen básicamente dos tipos de fotodetectores de semiconductor que se emplean en los receptores ópticos para sistemas de telecomunicaciones. El primero es comúnmente referido como fotodetector PIN, este genera un solo par electrón-hueco por fotón absorbido. El segundo se refiere como fotodetector de avalancha (APD), el cual presenta ganancia interna y genera mas de un par electrón-hueco, debido al proceso de ionización de impacto; este proceso se llama ganancia de avalancha; sin embargo la propiedad aleatoria del proceso de multiplicación de ionización de impacto introduce ruido que puede en algunas circunstancias, llegar a ser un factor dominante en la sensibilidad del receptor. Además dicho dispositivo requiere de altos voltajes de polarización para obtener ganancia, la cual depende de la temperatura.

## FOTODETECTORES PIN

Son los detectores mas comunes en los sistemas de comunicación por fibras ópticas. Estos dispositivos se forman con una capa de material semiconductor ligeramente contaminado, que se le llama región intrínseca (I), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, uno tipo n y otro tipo p. Cuando se le aplica una polarización inversa al fotodetector se crea una zona desértica (libre de portadores) en la región intrínseca, dentro de la cual se forma un campo eléctrico. En la fig. 6.2a se muestra la representación esquemática del fotodetector PIN con su circuito externo, y la distribución del campo eléctrico en la zona desértica se muestra en la fig. 6.2b.

Un fotón que llegue a la zona desértica, con energía mayor o igual a la del material semiconductor, puede perder su energía y evitar a un electrón que se encuentra en la banda de valencia, para que pase a la banda de conducción. Este proceso genera pares de electrón-hueco que se les llama fotoportadores. El fotodetector se diseña para que la mayoría de los electrones se absorban en la zona desértica y se generen fotoportadores, los cuales se separan debido al campo eléctrico presente en esta región. La colección d los fotoportadores genera un flujo de corriente en el circuito externo del fotodetector, a la cual se le conoce como fotocorriente.



**Fig. 6.2 Fotodetector PIN, a) Representación esquemática, b) Distribución del campo eléctrico.**

El circuito equivalente del fotodetector PIN y la red de carga, se muestran en la fig. 7.4. En operación el circuito se comporta como una fuente de corriente que genera una fotocorriente cuya expresión es:

$$I_P = P \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} P = P R$$

donde:

$P$  es la potencia óptica incidente en el fotodetector.

$\eta$  es la eficiencia óptica del fotodetector.

$q$  es la carga del electrón.

$h\nu$  es la energía del fotón.

$v=c/\lambda$  es la velocidad de la luz en el vacío.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$R$  es la responsividad del fotodetector.

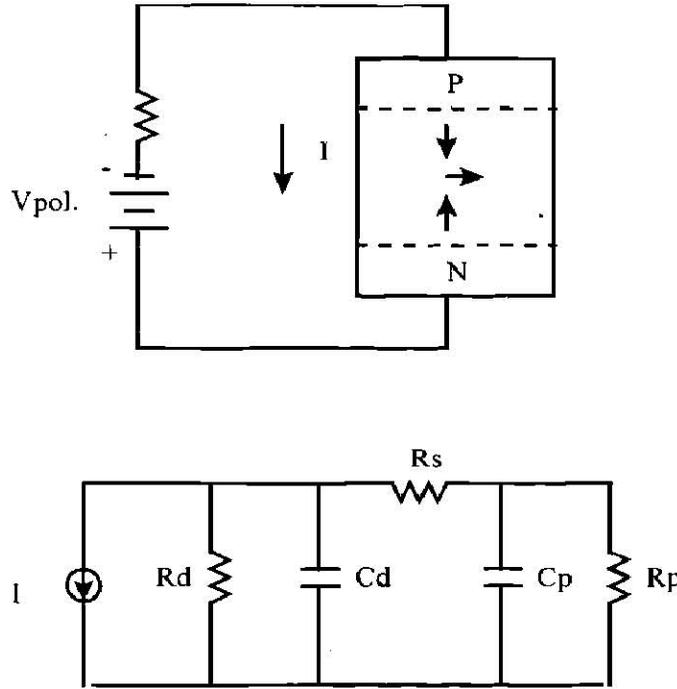


Fig. 6.3 Circuito equivalente de un fotodetector PIN.

En la fig. 7.4,  $C_d$  y  $R_d$  son la capacitancia y la resistencia de la zona desértica respectivamente, el valor de  $R_d$  en este tipo de fotodetectores es del orden de  $10^8 - 10^9 \Omega$ , por lo que normalmente se desprecia;  $R_s$  es la resistencia de la zona desértica, y  $C_p$  y  $R_p$  son la capacitancia y la resistencia dinámica de entrada en el preamplificador respectivamente. Los fotodetectores se diseñan para que funcionen bajo ciertas condiciones de operación específicas.

Sin embargo es posible usarlos fuera de las condiciones recomendadas en las hojas de datos con el objetivo de optimizar su funcionamiento. Si el dispositivo se opera fuera del voltaje de polarización recomendado por el fabricante, se debe tener en mente que varias de las características enlistadas en las hojas de datos se modifican. Los parámetros principales que se afectan al variar el voltaje de polarización de los fotodetectores son:

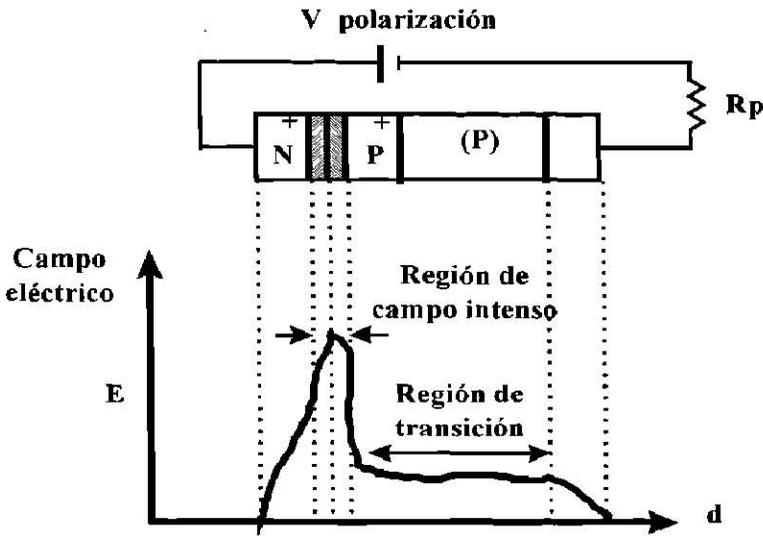
- 1.- La capacitancia y la resistencia de la zona desértica.
- 2.- La capacitancia y la resistencia de la zona no desértica.
- 3.- La responsividad.
- 4.- El ruido (corriente de oscuridad).
- 5.- La velocidad de respuesta.

La capacitancia del fotodetector ( $C_d$ ) combinada con la impedancia de carga ( $Z_l = R_p // C_p$ ) y la resistencia serie ( $R_s$ ), forman la constante de tiempo del sistema. Esta constante de tiempo no debe ser muy grande con respecto al tiempo de colección de cargas por lo que el diseñador de receptores ópticos deberá determinar la capacitancia del fotodetector y su importancia para una aplicación en particular. Esta capacitancia es un dato que normalmente el fabricante proporciona en la hojas de datos y se especifica para un determinado voltaje.

**FOTODETECTORES DE AVALANCHA**

Cuando a un detector se le aumenta el voltaje de polarización, llega un momento en que la corriente crece incontrolablemente por el fenómeno de avalancha hasta la destrucción del dispositivo. La región a partir de la cual la corriente aumenta, se llama de avalancha. Si en esta región el fenómeno de avalancha se controla, la sensibilidad del fotodetector se incrementa notablemente. Para esto es fundamental que no se rebese la capacidad de disipación del dispositivo, por lo que es muy importante limitar la corriente de para un determinado voltaje de polarización.

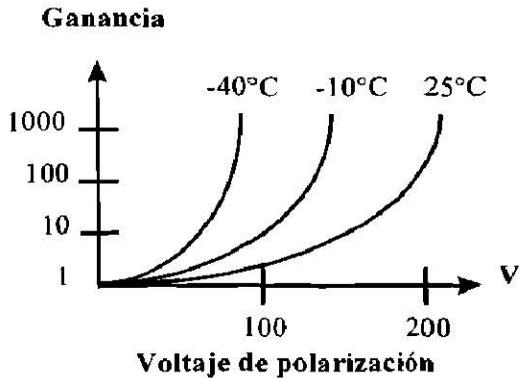
De acuerdo con esta idea, hay fotodetectores que funcionan con altos voltajes de polarización (50 - 400 Volts). Cuando se aplican altos voltajes de polarización en la unión P-N (ver fig. 7.6) a través de la zona de transición aparece un campo eléctrico muy intenso. En esta región los portadores de carga libres (pares electrón-hueco) se desplazan mas rápidamente, con mayor energía y liberan nuevos portadores secundarios, los cuales también son acelerados y capaces de producir nuevos portadores.



**Fig. 6.4 Fotodetector de avalancha.**

$V_B$  y  $n$  dependen del material del semiconductor y de las concentraciones de las impurezas empleadas en la fabricación del fotodetector. Dado que el mecanismo de avalancha esta sujeto a fluctuaciones estadísticas, se tiene un factor de ruido que aumenta con la ganancia, por tal motivo, aunque existan dispositivos con ganancias hasta de 1000, las ganancias que comúnmente se utilizan en los sistemas de telecomunicaciones por fibras ópticas están entre 10 y 100.

La máxima ganancia del APD se obtiene antes de su voltaje de ruptura, sin embargo no es recomendable utilizarlo en esta condición, dado que el ruido también es máximo además de que el voltaje de ruptura del fotodetector depende fuertemente de la temperatura. En la fig. 7.8 se muestran curvas típicas de ganancia contra voltaje de polarización de un fotodetector de avalancha para temperaturas de  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  y  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Fig. 6.5 Voltaje de polarización.**

## RUIDO EN RECEPTORES OPTICOS.

En un sistema de telecomunicaciones por fibras ópticas, el receptor tiene como función, extraer la información contenida en la señal óptica perturbada por ruido. En la fig. 6.6 se muestra un receptor óptico y varias fuentes de ruido, y algunos factores de degradación que limitan su funcionamiento.

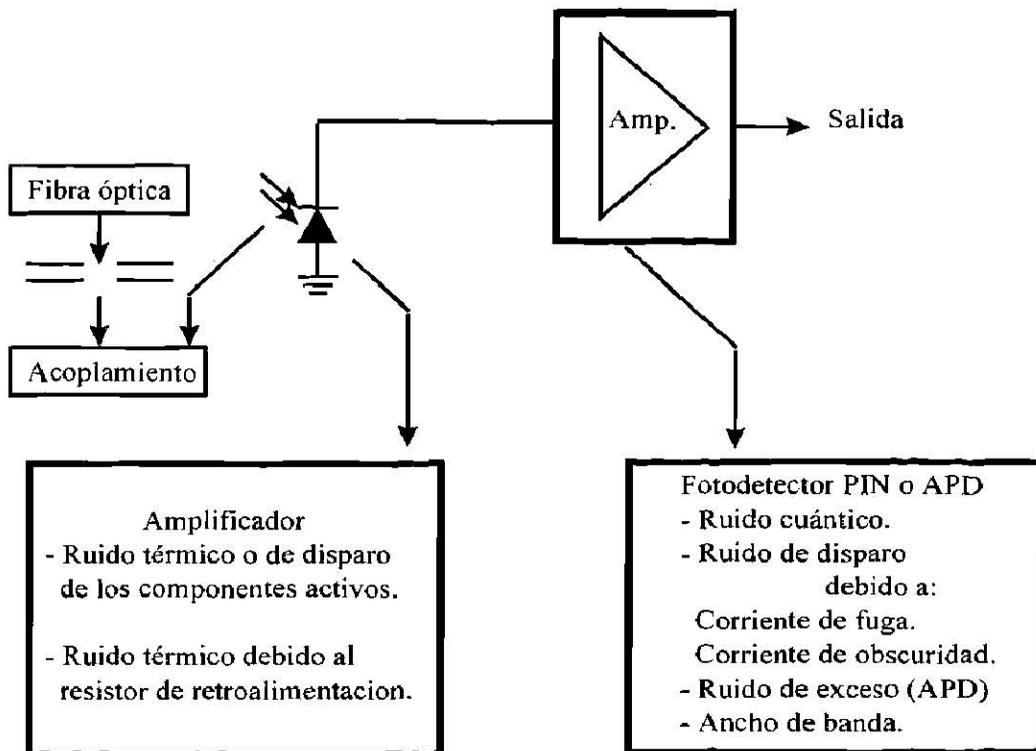


Fig. 6.6 Fuentes de ruido y otros factores de degradación en receptores ópticos.

Los ruidos principales que limitan el funcionamiento de los receptores ópticos con detección directa son:

**1.- Ruido de fondo.-** Este ruido se interpreta como la potencia óptica incidente cuando no hay señal (mensaje). En los sistemas digitales que utilizan como fuente de luz un LD, la razón de extinción es importante ya que es necesario tener la mínima radiación de fondo.

**2.- Ruido de mezcla.-** Este ruido se presenta en el fotodetector por los diferentes componentes espectrales de la luz incoherente. Se tiene este ruido esencialmente en sistemas con transmisores con LED y fibras ópticas multimodo.

**3.- Ruido cuántico.-** La manifestación de este ruido se da en la estadística de la fotodetección, es decir, por la aleatoriedad de la generación de portadores.

**4.- Ruido de corriente de oscuridad y de corriente de fuga.-** La corriente de oscuridad se debe a la generación térmica de pares electrón-hueco en el fotodetector cuando no le incide luz. La corriente de fuga se debe a las corrientes de superficie, que dependen básicamente del proceso de fabricación de los fotodetectores.

**5.- Ruido térmico.-** Este tipo de ruido se presenta en todos los resistores que se encuentran en la entrada del preamplificador óptico, siendo el dominante el del resistor de polarización del fotodetector o del resistor de retroalimentación del amplificador. Si el preamplificador utiliza un FET como dispositivo activo de entrada, hay que tomar en cuenta el ruido térmico que genera el canal, además del ruido generado por los resistores.

**6.- Ruido de exceso.-** Este ruido se genera en los APD y es causado por el fenómeno llamado de avalancha.

**7.- Ruido del preamplificador.-** Las fuentes principales de ruido en los preamplificadores están fundamentalmente determinadas por la etapa de entrada y por la red de retroalimentación, si éste es de transimpedancia.

## RUIDO EN FOTODETECTORES

El proceso de detección de los fotodetectores consiste en la absorción de fotones para producir pares electrón-hueco, los cuales inducen corriente en el circuito externo. Dado que los fotones llegan aleatoriamente y caracterizados por la estadística de Poisson, la corriente producida también es aleatoria. Las fluctuaciones en la corriente tienen el mismo carácter del ruido de disparo, que en este caso se denomina ruido cuántico. Para una fotocorriente  $I_p$ , tal como la expresada en la ecuación 7.1, dichas fluctuaciones se caracterizan por el ruido cuadrático medio con densidad espectral:

$$\frac{d}{df} \langle i^2 \rangle = 2qI_p$$

donde  $f$  es la frecuencia en Hertz e  $I_p$  es la corriente total del fotodetector.

Este ruido es función de la potencia óptica incidente y representa el límite fundamental en el proceso de detección.

Si el detector es un PIN, la corriente total ( $I$ ) es:

$$I = I_p + I_{fuga} + I_{obscuridad}$$

Entonces el ruido total en el detector es  $2qI$ .

Para los APD hay que incluir la ganancia de avalancha promedio ( $\langle M \rangle$ ), por lo que se tiene:

$$I = (I_p + I_{fuga} + I_{obscuridad}) \langle M \rangle$$

la densidad espectral del valor cuadrático medio del ruido para este caso es:

$$\frac{d}{df} \langle i^2 \rangle = 2qI \langle M^2 \rangle F(M)$$

donde  $F(M)$  es el factor de ruido de exceso, que es una medida de degradación del proceso de ganancia real. Si el proceso de ganancia se supone ideal,  $F(M) = 1$ . El valor de este factor depende del material del fotodetector, de la forma que toma el perfil del campo eléctrico dentro del dispositivo y de como se inicia la avalancha, con huecos o con electrones.  $F(M)$  se caracteriza analíticamente de dos formas.

La primera es aproximada y esta dada por:

$$F(M) = \langle M \rangle^x$$

donde el parámetro  $x$  toma valores de 0.5 para APD de silicio y de 0.85 a 1 para APD de germanio.

La ecuación exacta de  $F(M)$  es:

$$F(M) = \langle M \rangle \left\{ 1 - (1-K) \left( \frac{\langle M \rangle - 1}{\langle M \rangle} \right)^2 \right\} \cong 2(1-K) + K \langle M \rangle$$

donde  $K$  es el coeficiente de ionización.

Los APD funcionan mejor para valores pequeños de  $K$ , para silicio  $K = 0.2 - 0.1$  y para germanio  $K = 0.5$ .

## CAP. 7 REDES DE COMUNICACIONES

### REDES LOCALES A TRAVES DE FIBRAS ÓPTICAS

Las redes locales son sistemas de comunicación multiterminal de acceso múltiple, de cobertura reducida (<10 Km.) y de velocidad limitada (normalmente 10 Mbps.), aunque se tienen velocidades de 100 Mbps. Una de las características de las redes locales es que el medio de transmisión y el ancho de banda son compartidos por todas las estaciones, a través de algún medio de acceso múltiple. Los principales son:

#### 1) Acceso dedicado:

- a) Acceso múltiple por división de frecuencia.
- b) Acceso múltiple por división de longitud de onda.
- c) Acceso múltiple por división de tiempo.

#### 2) Acceso por contención:

- a) Acceso múltiple por detección de portadora con detección de colisión (CSMA/CD).
- b) Paso de Token.

#### Interconexión de redes locales por un enlace punto a punto a través de fibra óptica.

La primera aplicación de la fibra óptica en redes locales, es la sustitución de enlaces típicos lográndose que la red se pueda extender geográficamente algunos kilómetros por encima de sus límites (ver fig. 7.1).

Un enlace de interconexión permite que dos redes basadas en cables coaxiales puedan incorporarse en una sola, con un cable de fibra óptica bidireccional que tiene conectados en sus extremos unos dispositivos llamados de acceso múltiple, que es en donde se logra el acceso a la red. Estos enlaces ofrecen seguridad y buen desempeño, gracias a que las fibras ópticas tienen inmunidad a las interferencias electromagnéticas y al mismo tiempo se aíslan eléctricamente de las redes.

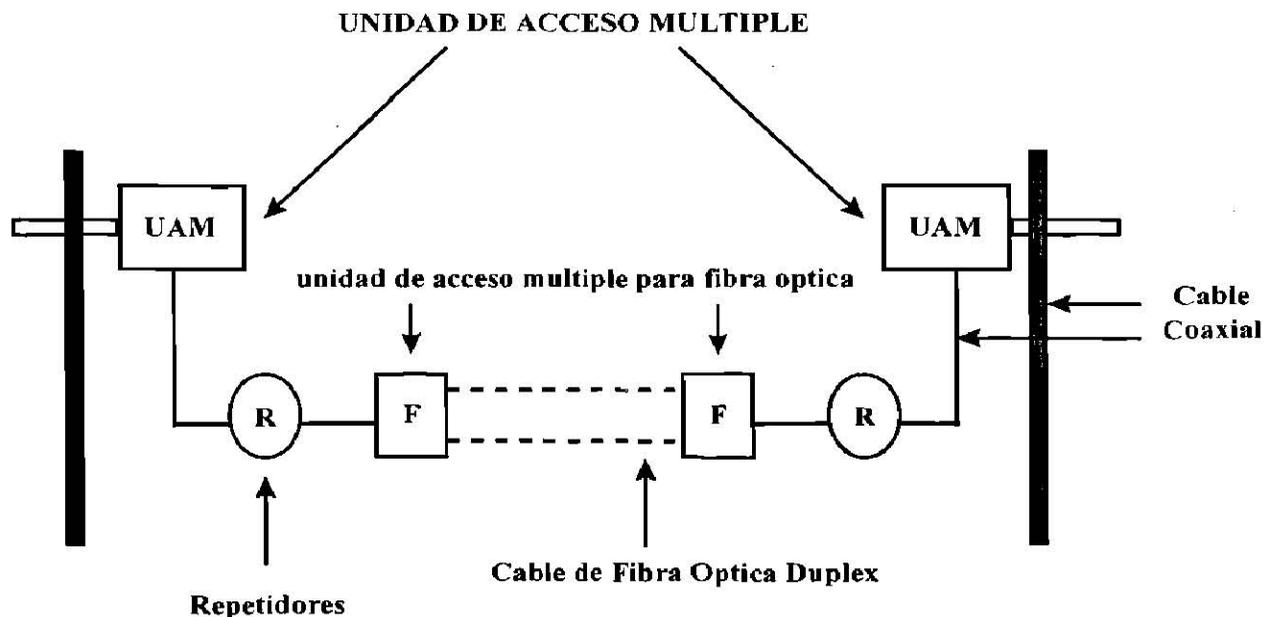


FIG. 7.1 Enlace de fibra óptica (inter-repetidor) en redes locales.

## REDES LOCALES DE FIBRAS OPTICAS UTILIZANDO ACCESO POR CONTENCIÓN.

CSMA/CD (Carrier-Sense Multiple Access/Collision Detection)

El estándar Ethernet está basado en la transmisión bidireccional de la energía eléctrica en cables, sin embargo este estándar puede implementarse sobre enlaces de fibras ópticas. En este esquema se utiliza un elemento central, donde se conecta cada estación. El elemento central actúa como un repetidor, cuando una estación transmite, la señal se envía hacia cada una de las estaciones conectadas (ver Fig. 7.2). La configuración puede ser estrella o estrella multinivel.

Aun cuando el esquema es el correspondiente a una estrella, en realidad, virtualmente se tiene un medio común para todas las estaciones. La transmisión de cualquier estación es recibida por todas las otras estaciones, y si dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo, habrá una coalición, como sucede en las redes basadas en cables coaxiales.

El problema central que se presenta aquí, reside en la detección de las colisiones. Para lograr la conexión de un número de estaciones, al menos las que se puedan conectar con cable coaxial, se requiere una configuración que utiliza varios elementos centrales, tal como, lo muestra la fig. 7.2.

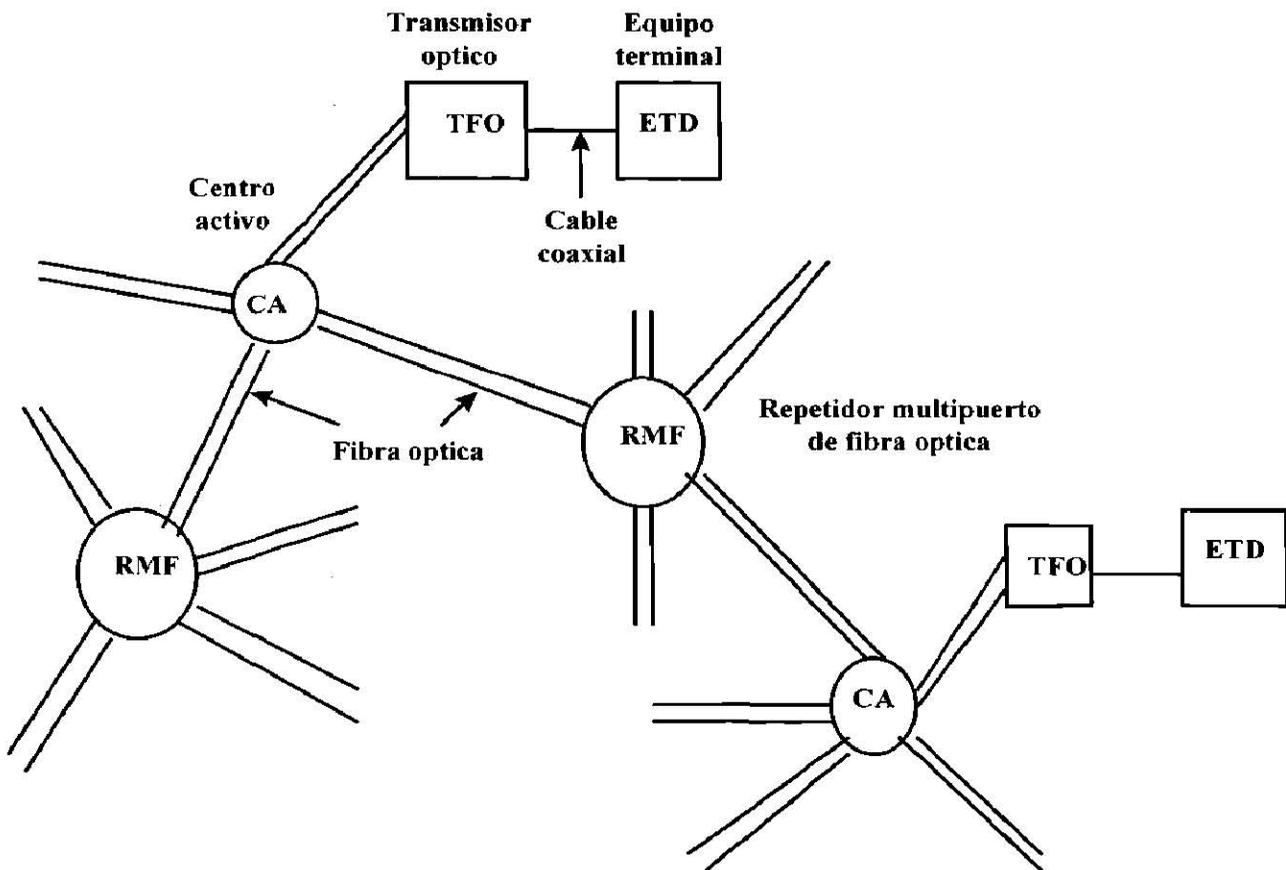


FIG. 7.2 Red de fibra óptica basada en elementos centrales y utilizando CSMA/CD

## REDES LOCALES DE FIBRAS OPTICAS UTILIZANDO CONMUTACION POR DIVISION EN EL TIEMPO

En 1988, se inicio el desarrollo del estandar de Canal de Fibra Optica (Fiber Channel Standard), para la intercomunicacion serial de computadoras hacia dispositivos perifericos de almacenamiento de datos. Esto tendra a reemplazar los enlaces punto a punto seriales, ampliamente usados en el mundo de las supercomputadoras. El esfuerzo de estandarizacion es relativamente nuevo y es importante por ser el primer estandar de la capa de control de acceso al medio para servicios que requieren velocidades de gigabits.

Cuando se reuquiere enviar datos en enlaces punto a punto, el estandar de Canal de Fibra puede emplearse en redes locales con el objeto de utilizar una sola interfaz fisica para el control periferico, en las redes, estas operan a velocidades de gigabits (ver fig. 10.6).

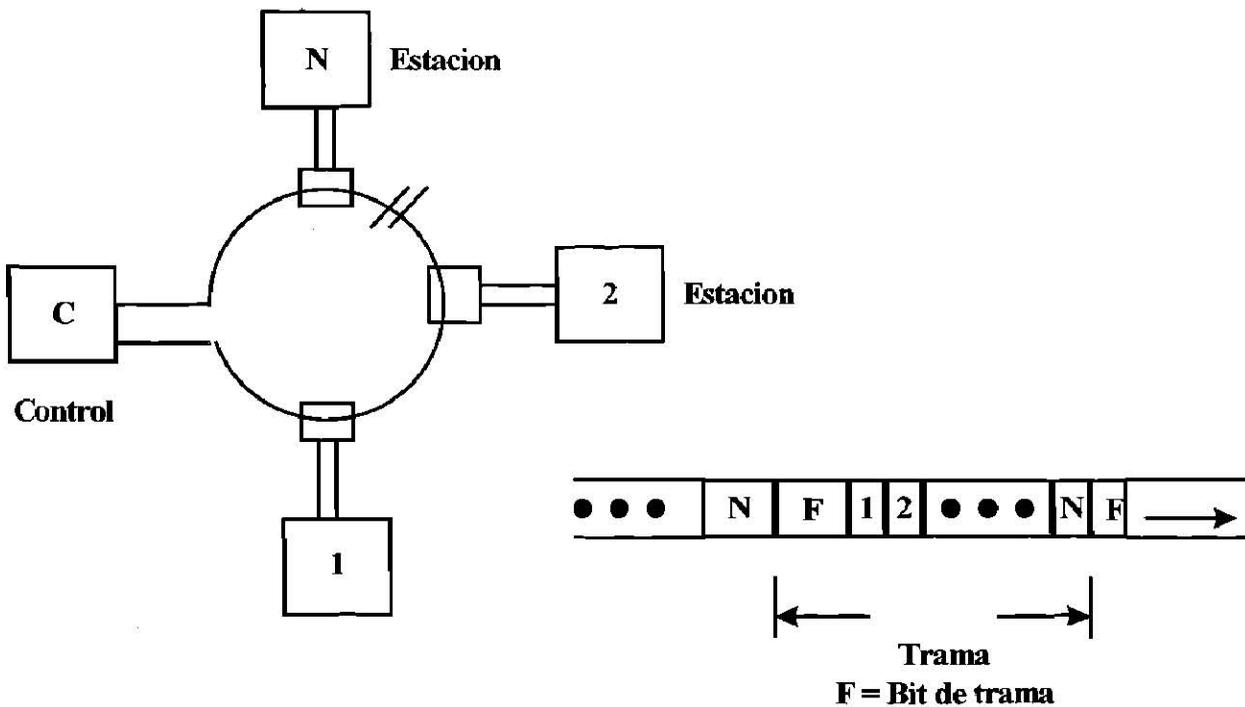


FIG. 7.3 Esquema de acceso múltiple por división de tiempo.

## COMPONENTES DE RED

### TRANSMISOR-RECEPTOR ÓPTICO

Este es un componente fundamental, debido a que establece un enlace bidireccional del que dependen los otros componentes. El transmisor-receptor se interfaza con la unidad de interface estandar IEEE 802.3 de especificaciones electricas y conectores opticos SMA. El enlace tranporta una señal continua todo el tiempo, con un intervalo dinamico de 25 dB al mismo tiempo de detectar una ruptura de la fibra o niveles de potencia bajos.

El intervalo dinamico permite usar enlaces sin ajuste, de cualquier longitud hasta los 2 Km., con cualquiera de las fibras de indice gradual (50/125, 62.5/125, 85/125, 100/140 $\mu$ m.)

## REPETIDOR DE DOS PUERTOS DE FIBRA ÓPTICA

Este elemento tiene un transmisor-receptor interno por un lado y por el otro una conexión eléctrica. De este modo, dos elementos se pueden usar para interconectar dos redes locales basadas en cables eléctricos (ver fig. 10.1). El receptor realiza las mismas funciones que un transmisor-receptor que cumple con el estandar 802.3: reconstitución del preámbulo; extensión del fragmento; ajuste del ancho de los pulsos. También incorpora las funciones de un transmisor-receptor de fibra óptica para los datos de eco, detección de colisión, modulación de señal inactiva e indicación de niveles de potencia de la señal óptica.

## REPETIDOR MULTI-PUERTO PARA FIBRA ÓPTICA

La sección del repetidor de IEEE 802.3 esta desarrollada de tal modo que permite a un repetidor con puertos multiples, ser capaz de formar un elemento central radial de repetición. El repetidor multi-puerto se ha diseñado con 7 puertos ópticos y una unidad de interface eléctrica, y permite la interconexión económica de fibras hacia una red basada en conductores eléctricos. Cumple con las mismas funciones que el repetidor de dos puertos.

En los enlaces ópticos para los repetidores multi-puerto, pueden ser conectados a otro repetidor multi-puerto, a un repetidor de dos puertos, a un elemento activo o a un transmisor-receptor de fibra óptica, proporcionando flexibilidad en la construcción de una red.

## ELEMENTO CENTRAL ÓPTICO

El elemento central activo detecta colisiones y las muestra en todos sus puertos. Distribuye los paquetes bien recibidos a todos los puertos excepto al fuente; difiere del repetidor porque no requiere de realizar funciones de reconstrucción del preámbulo ni ajuste en el ancho de los pulsos. El diseño se desarrolla en dos configuraciones: 6 puertos ópticos y un puerto eléctrico o 12 puertos ópticos y dos puertos eléctricos, permitiendo la construcción simple de una red optica estrella en el 100% de efectiviadd en la detección de colisiones. Opcionalmente puede conectarse a una red basada en conductores eléctricos o servir de interface a dispositivos de interconexión para otros servicios. Como en los otros elementos, también es posible detectar la ruptura de la fibra o el nivel de potencia óptica insuficiente.

## DERIVADOR

Este elemento es de construcción similar al acoplador 2x2, sin embargo, este tiene dos entradas y una sola salida. Se utiliza para conectar estaciones a redes locales basadas en líneas individuales (ver fig. 7.4).

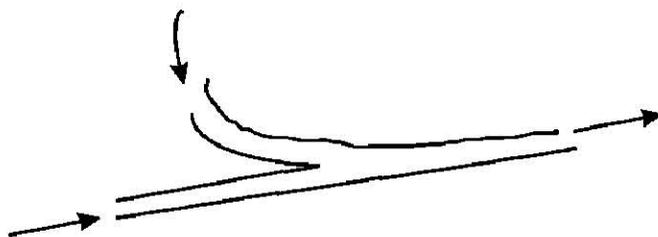


FIG. 7.4 Derivador.

