

156  
21.



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**LA FIBRA OPTICA**

**T E S I S**

Que para obtener el Título de:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A**

**ENRIQUE EDUARDO SANDOVAL HERNANDEZ**

**A S E S O R**

**ING. BENJAMIN CONTRERAS SANTACRUZ**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX. 1997.**

**TESIS CON**  
**FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"La Fibra Óptica".

que presenta el pasante: Enrique Eduardo Sandoval Hernández  
con número de cuenta: 7694771-9 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a        de        mayo de 1997.

PRESIDENTE	<u>Ing. José Juan Contreras Espinosa</u>	
VOCAL	<u>Ing. Benjamin Contreras Santacruz</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Jorge Buendía Gómez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Juan González Vega</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Alfonso Contreras Márquez</u>	<u>Alfonso Contreras Márquez</u>

*A mi mamá Sra. Tomasita Hernández Ríos  
por su paciente fe e inspirados esfuerzos*

*A mi papá Sr. José  
Concepción Sandoval  
por darme generosamente  
la libertad de elegir*

*A Martha Elenita, ejemplo de valor y resignación*

*A Martha, por su apoyo incondicional  
y ayuda.*

*A Momis y a Adriana con  
todo cariño*

## INTRODUCCION

**En términos generales este trabajo presenta algunos fundamentos de la tecnología de las fibras ópticas, los principios en que se basa la propagación de ondas luminicas en fibras de vidrio, los procesos de fabricación de fibras ópticas, los empalmes los conectores, las técnicas de medición, la conversión óptico - eléctrica y eléctrica - óptica y finalmente algunos fundamentos de modulación y multiplexado**

## **INDICE DE LA TESIS**

- I Principios de las fibras ópticas**
- II Fabricación de las fibras ópticas**
- III Componentes de las fibras ópticas**
- IV Empalmes y conectores**
- V Conversión, distribución e interrupción de señales ópticas**

## CAPÍTULO 1.

### PRINCIPIOS DE FIBRAS ÓPTICAS.

#### 1.1.- OBJETIVOS DEL CAPÍTULO.

En éste capítulo además de algunos conceptos elementales como la reflexión y la refracción de la luz se discute la propagación de la luz en una fibra de índice escalón. La reflexión interna total, la cual es el principio básico fundamental y algunos detalles de la propagación de la luz en fibras son presentados, incluyendo las modalidades de propagación el ángulo de propagación y el ángulo de aceptación. Un término importante apertura numérica, la cual está relacionada a la diferencia de índice de refracción relativo entre el núcleo y el revestimiento, es discutido también. Finalmente en este capítulo se hace un análisis de las causas fundamentales de la pérdida de luz en las fibras ópticas.

#### 1.2.- ¿Qué es la fibra óptica?

Las comunicaciones por fibra óptica implican el uso de la luz, confinada en una delgada guía de luz dieléctrica, con el objeto de transmitir información. Un sistema básico para la transmisión por medio de fibras ópticas consiste en un transmisor (que es un emisor óptico), un medio de propagación (la fibra óptica en forma de cable) y un receptor (detector óptico). La fibra óptica por la que ha de circular la luz debe ser extremadamente luminosa, de muy alta transparencia y sumamente delgada. Para comprender de que manera éstas fibras de material transparente consiguen encaminar la luz para guiarla, hemos de recurrir a los principios de reflexión de la luz, entre otros.

#### 1.3.- Reflexión y refracción de la luz.

En el lenguaje de la óptica cuando un rayo de luz incide sobre una superficie definida entre dos medios transparentes es dividido en una parte reflejada y una refractada. La ley de la reflexión establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{Ecuación 1.1.}$$

La refracción de la luz se realiza siempre que un rayo de luz atraviesa la interface, y se verifica cuando la luz pasa de un material menos denso a otro de mayor densidad y viceversa.

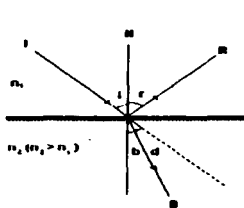
La ley de la refracción establece que: el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, es constante para cada par de materiales y recibe el nombre de índice de refracción "n".

$$n = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} \quad \text{Ecuación 1.2.}$$

Así tenemos que la luz de un material con índice de refracción menor a un material con índice mayor, entonces tenemos que  $\theta_r > \theta_i$ , de tal manera que el rayo refractado **B** tenderá acercarse a la normal.

Por otro lado si la luz va de un material con índice de refracción mayor a uno con índice de refracción originará que  $\theta_r < \theta_i$  y con ello la luz tiende a alejarse de la normal.

### 1.3.1.- Reflexión total.



Notaciones:

$N$  = Normal.

$I$  = Rayo incidente.

$R$  = Rayo reflejado.

$B$  = Rayo refractado.

$i$  = Ángulo de incidencia.

$r$  = Ángulo de reflexión.

$n_1$  = Índice de refracción del medio 1

$n_2$  = Índice de refracción del medio 2

$b$  = Ángulo de refracción.

$d$  = Ángulo de desviación.

FIGURA 1.1 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ.

Cuando el rayo de luz viaja desde un medio más denso  $n_2 > n_1$ , hacia uno menos denso, de tal manera que si aumentamos  $\theta_i$ ,  $\theta_r$  aumenta más y pronto igualará a  $90^\circ$  que es el máximo posible si  $\theta_i$  aumenta más, ya no se produce la refracción, sino únicamente la reflexión, por lo que ha dicho fenómeno se le llama reflexión total, y ángulo de incidencia mínimo a que se produce este fenómeno, se le llama ángulo límite ó ángulo de reflexión total



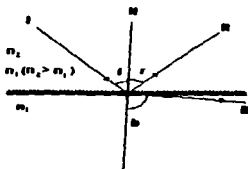


FIGURA 1 2 REFLEXIÓN TOTAL.

### 1.3.2.- Reflexión de Fresnel.

No toda la luz que coincide sobre una superficie puede penetrarla ya que una pequeña parte será reflejada. La reflexión de Fresnel  $p$  en el lindero entre el aire y otro material equivale a:

$$p = (n-1/n + 1)^2 \quad \text{Ecuación 1.3.}$$

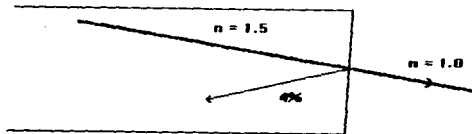


FIGURA 1.3 REFLEXIÓN DE FRESNEL.

#### 1.4.- Dispersión de Rayleigh.

Cuando la luz se propaga a través de un material no completamente homogéneo, la luz puede desviarse en otras direcciones distintas a la dirección de propagación ( figura 1.4 ). Éste fenómeno llamado dispersión de Rayleigh, se debe a la existencia de pequeñas partículas y zonas no homogéneas las cuales al ser iluminadas emiten luz en todas direcciones. La luz emitida es llamada luz de Tyndall.

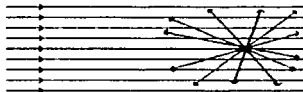


FIGURA 1 4 DISPERSIÓN DE RAYLEIGH.

#### 1 5 - Perfil de un conductor de fibra óptica

Un conductor de fibra óptica en su forma más simple está constituido por el núcleo y el revestimiento que lo rodea. Si en el conductor de fibra óptica se considera el índice de refracción " n " en función del radio, se tiene el perfil del índice de refracción de éste conductor. Con el mismo se describe la variación radial del índice de refracción del conductor de fibra óptica desde el eje del núcleo hacia la periferia, el revestimiento.

##### 1 5 1 - Perfil escalonado.

Para que la luz sea conducida en el núcleo de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado el índice de refracción del núcleo  $n_1$  debe ser mayor que el revestimiento  $n_2$ . Si el valor del índice de refracción  $n_1$  se mantiene constante en toda la sección del núcleo se habla del perfil escalonado del índice de refracción. Pues el índice se incrementa en forma de escalón a partir del valor que tiene en el revestimiento hasta el que posee el núcleo y ahí permanece constante.

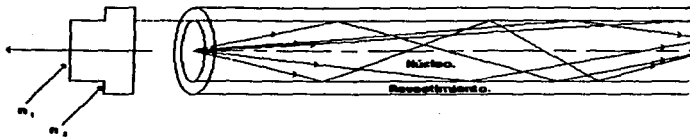


FIGURA 1.5. FIBRA ÍNDICE ESCALÓN

1.5.2.- Perfil gradual.

Los rayos luminosos recorren el conductor de fibra óptica describiendo trayectorias onduladas ó helicoidales; contrariamente al conductor del perfil escalonado en cuyo caso los rayos se propagan en forma zigsagueante.

Como consecuencia de la variación gradual del índice refracción en el núcleo, los rayos luminosos también se refractan continuamente variando su dirección de propagación al recorrer estas trayectorias helicoidales. Si bien los rayos que oscilan en torno al eje deben recorrer un camino más largo que el que se propaga a lo largo de este eje, pueden desarrollar una mayor velocidad proporcional al menor índice de refracción que tiene el material en los puntos más alejados del eje, y así se compensa en el tiempo la mayor extensión del recorrido. Como resultado de ésta compensación desaparece casi totalmente la diferencia de tiempos de recorrido.

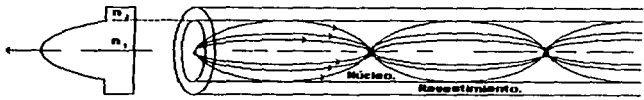


FIGURA 1.6 FIBRA ÍNDICE GRADUAL

1.6.- Propagación de la luz.

La figura 1.7. ilustra una fibra de índice escalón. La luz en la fibra se propaga mediante rebote hacia atrás y hacia adelante de la cara interna núcleo-revestimiento. Para simplificar la discusión, se usara la técnica de rayo rastreador. Esto es, usted seguirá un rayo prueba a través de la fibra. Usted dará por asumido de que el rayo prueba pasa a través del eje de la fibra (tales rayos son llamados rayos meridionales).

El rayo propagándose en la fibra debe ser lanzado, dentro de la fibra hacia un extremo. Las condiciones necesarias para inyectar tales rayos eficientemente dependen en la estructura de la fibra, como en las características de la fuente.

### 1 6 1 - Reflexión interna total.

Una fibra típica de índice escalón se muestra en la figura 1.7 en ella se muestran dos rayos, uno ( línea sólida ) es inyectable en un ángulo menor de lo que está el otro ( la línea punteada ) Siga el rayo punteado primero ( la línea punteada ) En la interfase A, entre el aire y el núcleo sucede la refracción y el rayo continúa en un ángulo todavía menor, más cercano al eje esto es  $\theta_2 > \theta_1$ . El rayo entonces llega a la interfase núcleo revestimiento al punto B Otra vez, la refracción sucede, el rayo se refracta y continúa en el revestimiento. Finalmente, el rayo se refracta otra vez, mientras sale de la fibra en la interfase revestimiento - aire en el punto C Sin embargo, esta vez el rayo sale de la fibra. Este rayo no está confinado y no se propaga a través de la fibra. Ahora siga el segundo rayo ( la línea sólida ). Otra vez la refracción sucede en el punto A. En el punto B interfase núcleo- revestimiento, la reflexión total sucede. Este rayo está confinado al núcleo de la fibra Dé por hecho que el ángulo de incidencia en la interfase núcleo - revestimiento es el ángulo límite y llámelo  $\alpha_c$ . Un rayo incidente con un ángulo mayor que  $\alpha_c$  se propagará en la fibra obteniéndose así lo que se conoce como la reflexión interna total. Este tipo de reflexión interna total sigue las mismas leyes que cualquier otro tipo de ellas, es decir  $\theta = 0$  Solo puede ocurrir cuando la luz índice es procedente de un medio de mayor índice

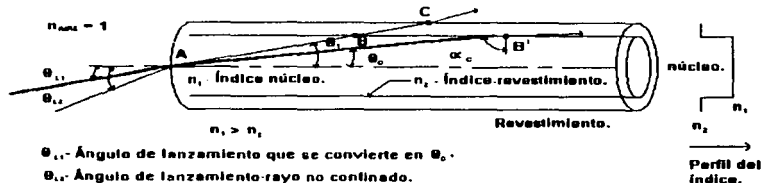


FIGURA 1 7 PROLONGACIÓN DE LA LUZ EN UNA FIBRA DE ÍNDICE ESCALONADO.

El rayo crítico (la línea sólida) en la figura 1.7 hace un ángulo  $\theta_c$  con el eje de la fibra. Rayos con ángulos de propagación mayores que  $\theta_c$  no se propagaran porque que  $\theta_i > \theta_c$ , y que el rayo  $\theta_i$  sale de la fibra y no es confinado a la fibra. El ángulo  $\theta_c$  es llamado ángulo de propagación crítico.

De la geometría.  $\text{Sen} \theta_c = \text{Cos} \theta_c = n_2 / n_1$ , Ecuación 1.4

Es importante notar que la reflexión interna total puede ocurrir cuando la luz viaja del índice mayor a un índice menor.

El rayo propagándose al ángulo crítico  $\theta_c$  es incidente en la interface núcleo - revestimiento en  $\theta_c = 90^\circ - \theta_c$ . Los valores dados de  $\theta_c \approx 12^\circ$  son típicos para fibras de índice escalón usados en comunicaciones.  $\theta_c$  de aproximadamente  $12^\circ$  es muy bajo y requiere de cuidado especial para asegurarse de que la luz entra y es confinada en la fibra. Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  en la figura 1.7 no son iguales a  $\theta_1$  y  $\theta_c$ .  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia de la luz entrando en el extremo de la fibra y  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos correspondientes de la propagación de la luz dentro de la fibra.

### 1.6.2.- Modalidad de propagación.

Todos los rayos con ángulos menores que  $\theta_c$  se propagaran en la fibra. En los fundamentos de la teoría electromagnética, estos rayos se propagan en ángulos distintos. Si el rayo crítico está propagándose a  $\theta_c = 12^\circ$  otros rayos se propagaran en ángulos distintos menores a  $12^\circ$ .

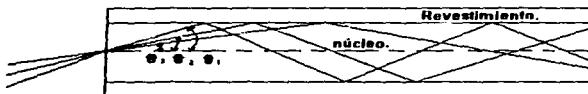


FIGURA 1.8 TRES MODALIDADES DE PROPAGACIÓN

La figura 1.8 muestra tres rayos distintos, propagándose a  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ . Estos rayos son referidos como modalidades de propagación. El número total de modalidades propagándose en la fibra aumentan mientras aumenta  $\theta_c$ . Así mismo el ángulo crítico  $\theta_c$  depende en la relación  $n_2 / n_1$ , sin embargo es muy común que el fabricante de fibra óptica no especifique en los índices de refracción, a cambio especifica la diferencia del índice de refracción relativo, la cual puede ser expresada como:

$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ , Ecuación 1.5

En tanto el número total de modalidades aumenta mientras la diferencia del índice de refracción relativo  $\Delta$  aumenta.

Es común distinguir entre modalidades de alto orden, a aquellas con ángulo de propagación cercano al ángulo crítico  $\theta_c$ ; y modalidades de bajo orden, aquellas con ángulo de propagación mucho menores que el ángulo crítico. Las modalidades de alto orden tienden a enviar energía de luz del revestimiento. Esta energía finalmente se pierde, particularmente en las curvas de la fibra.

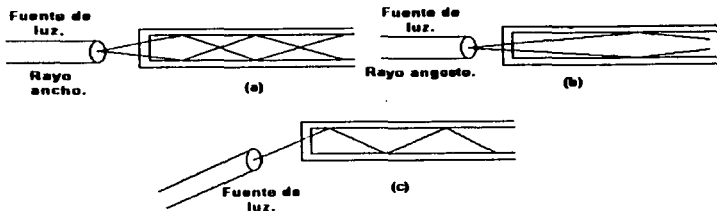


FIGURA 1.9 PRODUCCIÓN DE MODALIDADES DE ALTO Y BAJO ORDEN  
(a) modalidades de alto orden, (b) modalidades de bajo orden, (c) lanzamiento en curvas de la fibra

**Modalidad de conversión. (Modalidad de acoplamiento):** Ya sea que la energía de luz se propage en modalidades de alto orden, modalidades de bajo orden o una mezcla particular de modalidades depende en las condiciones de lanzamiento (el ángulo de incidencia de los rayos entrando en el extremo de la fibra) y en el grado que la modalidad de acoplamiento (la transferencia de la energía de luz de un modalidad a otra) sucede. Si la fuente de luz a ser acoplada en la fibra es a ángulos relativamente grandes, modalidades de alto orden serán establecidas (figura 1.9 a). Esto tiende a causar pérdidas, particularmente en las curvas de la fibra.

La figura 1.9 b muestra una fuente que acopla luz en ángulos más bajos y así modalidades de bajo orden son establecidas y la pérdida de la energía es reducida. En la figura 1.9 c la fuente de luz está desalineada y tiende a establecer modalidades más altas y con escapes. Es más eficiente evitar las situaciones mostradas en la figura 1.9 a y 1.9 c. La **modalidad de distribución** (la cantidad de energía relativa llevada por cada modalidad) inicialmente establecida en la fibra es sustancialmente alterada por la modalidad de acoplamiento (o modalidad de conversión).

La modalidad de distribución después de aproximadamente 1 ó 2 km de fibra alcanza lo que se llama modalidad de distribución de estado continuo (estable, sostenido). Esto significa que la distribución de energía de luz entre las modalidades es relativamente constante de ahí en adelante. Cada modalidad está llevando su equitativa porción de luz;

(aunque la modalidad de acoplamiento continúa a través de la fibra, la modalidad de distribución permanece relativamente sin cambiar)  
 La modalidad de acoplamiento ( la conversión de una modalidad a otra ) es causada por las curvas de la fibra grandes y pequeñas respectivamente. La figura 1.10 muestra lo que sucede a dos rayos mientras pasan a través de un macrodoble en la fibra.  
 Cuando el rayo con ángulo  $\theta_1$  alcanza el punto A, su ángulo de propagación se hace más grande que  $\theta_c$ . En la figura 1.10 este ángulo se da por hecho ser mayor que  $\theta_c$  ( el ángulo crítico ) y el rayo sale de la fibra. La modalidad  $\theta_1$ , a sido convertida a una modalidad de escape ( modalidad de muy alto orden y así perdida ). La modalidad de proporción en el ángulo  $\theta_2$  es convertida a una modalidad de orden más alto  $\theta_2'$  debido al doblamiento. Aquí  $\theta_2' > \theta_2$ . Note que la modalidad de conversión a ambas modalidades orden más alto y orden más bajo usualmente suceden ( Para probar este punto, vea que sucede a este rayo incidente al punto C. Los ángulos incidentes y reflejados deben ser los mismos)

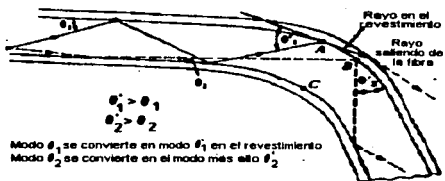


FIGURA 1 10 EFECTOS DE MACRODOBLADO

La figura 1.11 muestra modalidad de conversión causada por una pequeña desigualdad en la fibra, un microdoblamiento. Conversiones de modalidades de alto orden y bajo orden se muestran.

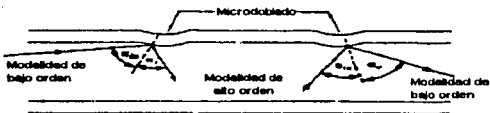


FIGURA 1 11 EFECTOS DE MICRODOBLADO

A veces es deseable establecer la modalidad de distribución de estado estable sobre un corto tramo de fibra introduciendo deliberadamente dobleces pequeños en la fibra. La fibra es presionada entre dos bloques cubiertos con lija fina ( una modalidad de block mezclado). La lija introduce indentaciones en la fibra que causa modalidad de mezclado incrementado. Este método también causa pérdida incrementada debido a que una de las modalidades se agrieta.

Una pregunta común considerando la propagación de la luz en la fibra es que si un rayo siempre viaja directamente a lo largo de la fibra paralelo al eje, la respuesta es que tal modalidad  $\theta = 0^\circ$  podría muy prontamente ser convertida a modalidades de orden más alto debido a los dobleces de la fibra.

Así de lejos todos los rayos se han dado por acentado meridionales, pasando a través del eje de la fibra. En realidad un gran número de rayos viajan por la fibra sin tener que ir por el eje. Rayos no meridionales u ondas skew (también llamados rayos skew) representan una parte significativa de la transmisión total de luz. Afortunadamente, el análisis de rayos meridionales da una aproximación cercana a lo que actualmente sucede, así que no es necesario incluir el análisis complejo de ondas skew. Las ondas skew son el resultado de la forma que la luz es inyectada dentro de la fibra y es casi imposible y también innecesario evitarlas.

### 1.6.3. - Ángulo de aceptación y apertura numérica.

El ángulo de propagación debe ser igual o menor que el ángulo crítico, para que todos los rayos que incidan en el núcleo puedan propagarse a lo largo de la fibra. Si usted sigue el rayo de línea sólida, existe refracción en el punto A, así que  $\theta_a$  no iguala a  $\theta_c$ . Los índices refractivos utilizados son aquellos de aire  $n_a = 1$  y el núcleo  $n_1$ .

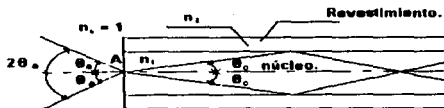


FIGURA 1.12 ÁNGULO DE ACEPTACIÓN.

Sólo los rayos que entran en la orilla de la fibra dentro del ángulo  $2\theta_a$  serán aceptados por la fibra. El ángulo  $2\theta_a$  es el **ángulo de aceptación**. En tres dimensiones es un cono de aceptación limitado por el ángulo  $2\theta_a$ .

Es útil relacionar el ángulo  $\theta_a$  a los índices de refracción de la fibra mediante la ley de Snell, en el punto A (figura 1.12)

$$\text{Sen } \theta_a / \text{sen } \theta_c = n_1 / n_a = n_1$$

$$\text{Sen } \theta_a = n_1 \text{ Sen } \theta_c$$

$$\text{Ecuación 1.6}$$



El término  $\text{sen } \theta_a$  es llamado apertura numérica (N.A.) y :

$$\text{N.A.} = \text{Sen } \theta_a = n_1 \text{ Sen } \theta_a \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Para obtener N.A. en términos de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , donde  $n_1$  es el índice del núcleo y  $n_2$  el índice del revestimiento, utilizando las ecuaciones 1.4, 1.7 y la identidad trigonométrica  $\text{Cos}^2 \theta = 1 - \text{Sen}^2 \theta$  se obtiene:

$$\text{N.A.} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

El ángulo  $\theta_a$  de media aceptación es dado por :

$$\theta_a = \text{Sen}^{-1}(\text{N.A.}) = \text{Sen}^{-1}(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Se puede expresar el N.A. en términos de diferencia de índice de refracción relativa  $\Delta$ , el cual se define como:

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2 n_1^2 \quad \text{de lo cuál se obtiene}$$

$$\Delta = (\text{N.A.})^2 / (2 n_1^2) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

De las ecuaciones 1.8 y 1.10.

$$(\text{N.A.})^2 = n_1^2 - n_2^2 = 2 n_1^2 \Delta$$

$$\text{N.A.} = n_1 (2 \Delta)^{1/2} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

### 1.7 Atenuación en las fibras ópticas

Las señales luminicas que se propagan a través de la fibra óptica experimentan una atenuación es decir una pérdida de energía, la cual es un parámetro básico para tener en cuenta en el diseño de un sistema de comunicaciones. La atenuación es debida a la absorción y a un proceso de dispersión (radiación) de la luz. Hay tres causa de atenuación de la luz en las fibras ópticas.

Atenuación en el material.

Atenuación de la luz esparcida.

Guía de onda y atenuación en curvas.

Todas ellas dependen de la longitud de onda, por tanto al elegir la longitud de onda de operación, la pérdida puede ser minimizada.

Hagamos primero un análisis de las definiciones básicas de pérdidas de potencia luminica

$P_{\text{entrada}}$  = es la potencia dentro de la fibra, y  $P_{\text{salida}}$  = es la potencia fuera de la fibra

Usando logaritmos de atenuación en decibeles (db) es definida como :

$$\text{Atenuación db} = 10 \log (P_{\text{sal}} / P_{\text{ent}}) \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Es de esperarse que la atenuación se incrementa con la longitud de la fibra, en tanto está dada en db / km

### 1 7 1 Atenuación de la fibra.

La atenuación que sufre la luz al propagarse a lo largo de la fibra óptica es función de la longitud de onda de la luz y de las impurezas e imperfecciones de la fabricación.

En la primera etapa de desarrollo de la tecnología de la fibra óptica, la longitud de onda más frecuentemente usada fue alrededor de 820 nm, debido a la disponibilidad de emisores y receptores de luz en este rango

En terminos de atenuación hay tres ventanas de operación que tienen bajas pérdidas, 820 nm, 1300 nm y 1550 nm. Un ilustración comparativa de las atenuaciones introducidas por las fibras ópticas (figura 1 13)

En base a estos datos el rango más apropiado de baja atenuación debida a absorción es el de 1550 nm. Y desde el punto de vista de dispersión, la longitud de onda más conveniente es alrededor de los 1300 nm. En años recientes emisores y receptores ópticos para ambos de estos rangos (ventanas) han sido desarrollados. El rango 1550 nm es particularmente promisorio en terminos de bajas atenuaciones

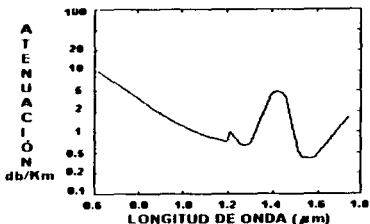


FIGURA 1 13 ATENUACIÓN COMO FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE Onda.

### 1 7 2 Atenuación en el material

Son pérdidas que implican absorción por el material. Estas incluyen absorción debida a la luz que interactúa con la estructura molecular del material, como fuente de pérdida por las impurezas del material.

Contribuye a esta pérdida la absorción infrarroja, la absorción ultra violeta UV, la absorción de iones metálicos y de iones OH (humedad). Las pérdidas más grandes son causadas por iones OH, estas no pueden ser suficientemente reducidas con el perfeccionamiento de los procesos de manufacturación. La absorción de impurezas de iones OH originan pérdida para determinadas longitudes de onda como se muestra en la figura 1.14

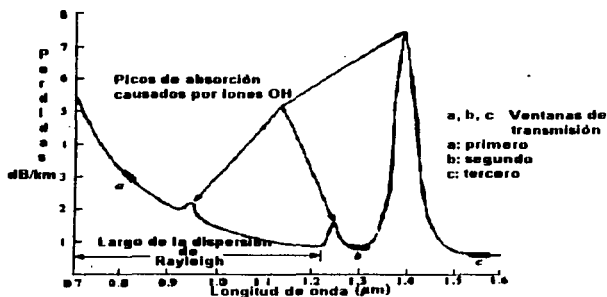


FIGURA 1.14 ESPECTRO DE PÉRDIDAS DE FIBRAS

Las pérdidas alrededor de 4 dB/km ocurren cerca de  $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$  para una concentración de impurezas de 1 ppm. En la figura 1.13 se da la absorción OH máxima (pico) para una concentración algo mayor que 1 ppm. Nótese los tres picos de pérdidas que ocurren en longitud de onda  $\lambda = 0.93, 1.25$  y  $1.4 \mu\text{m}$ .

### 1.7.3.- Atenuación debida a la luz esparcida

Cuando la luz es dispersada por una obstrucción, el resultado es pérdida de potencia, el término obstrucción se refiere a las variaciones de densidad en el material que resultan de cambios en el índice de refracción. Cuando estas imperfecciones son moleculares en tamaño, la pérdida de potencial es debida a la dispersión de Rayleigh. Estas pequeñas imperfecciones son inherentes al proceso de manufacturado y no pueden ser eliminadas. Se comportan del mismo modo que un punto de origen dispersa luz en todas direcciones. Pérdidas de dispersión de Rayleigh muy grandes dependen de la longitud de onda. En  $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ . Por ejemplo, las pérdidas de Rayleigh típicas para una fibra de vidrio son alrededor de 0.1 dB/km.

### 1.7.4.- Atenuación por guía de onda y microcurvaturas

Variaciones estructurales en la fibra ó de deformación de la fibra causan radiación de luz hacia afuera de ella. La figura 1.15 ilustra radiación causada por un cambio en el diámetro. Aquí el ángulo  $\alpha_c$  es más pequeño que el ángulo crítico de tal manera que el rayo sólido de la fibra (línea sólida), con la ausencia de la deformación el rayo sería confinado a la fibra como es ilustrado por la línea punteada.



FIGURA 1 15 PÉRDIDAS POR RADIACION CAUSADAS POR ALTERACIÓN EN EL DIÁMETRO

### 1 7 5 Dispersión

El término dispersión es usado para describir el efecto de ensanchamiento de pulso para fibras ópticas. La figura 1 16 muestra que el pulso que aparece a la salida de la fibra es más ancho que el pulso de entrada. Como la señal es un pulso de luz que viaja a lo largo de la fibra, cambia de ancho a causa de algunos fenómenos de propagación.

La dispersión puede ser definida como la duración de impulso de luz de salida producida por una duración de impulso de entrada cercano a cero, en otras palabras se asume que la duración de impulso es cero la duración de impulso a la salida es totalmente un resultado de la dispersión en la fibra. En términos prácticos se tiene una duración de impulso de entrada  $t_1$  y una duración de impulso de salida  $t_2$ , con  $t_2$  más largo que  $t_1$ , la dispersión  $\Delta t$  puede ser definida por

$$\Delta t = (t_2^2 - t_1^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación 1 13}$$

Note que la dispersión en la fibra es medida en unidades de tiempo. La dispersión total de una fibra depende de su longitud una fibra larga causa pulsos con mayores ensanchamientos, es decir, tiene mayor dispersión.

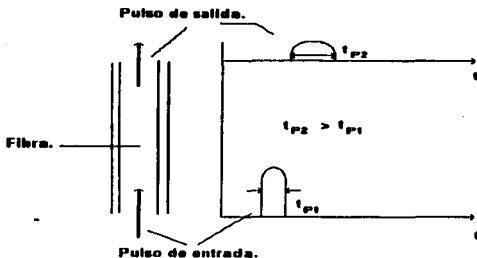


FIGURA 1.16 ENSANCHAMIENTO DE PULSO.

La dispersión se puede dividir en dos categorías generales.

Dispersión modal.

Dispersión intramodal ó cromática.

#### 1.7.6.- Dispersión modal.

Este tipo de dispersión resulta del hecho de que la luz se propaga en modalidades (modos). Es una dispersión entre modos, causada por la diferencia en el tiempo de propagación, para entender este tipo de dispersión considere dos modos diferentes de propagación a lo largo de la fibra eje ilustrados en la figura 1.17 a , el modo crítico de propagación de ángulo  $0c$  y otro modo donde el ángulo de propagación es cero ( modo cero). Un pulso de luz lanzado hacia la fibra se propagará a lo largo de ella de ambos modos. Para el modo cero, el tiempo de recorrido será mínimo y puede ser expresado por

$$t_{00} = L / (c / n_1) = L (n_1 / c)$$

Ecuación 1.14

Donde  $L$  es la longitud de la fibra,  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo y  $c / n_1$  es la velocidad de la luz en la fibra.

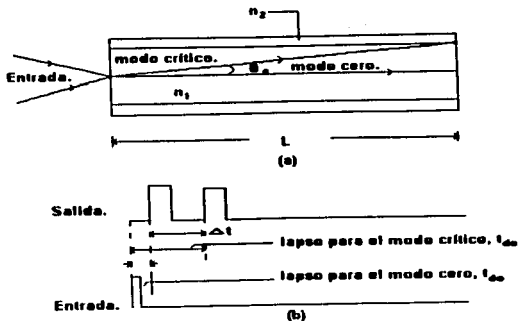


FIGURA 1.17 DISPERSIÓN MODAL .  
(a) trayecto del rayo. (b) lapso del tiempo.

Para el rayo que viaja en ángulo  $\theta$ , el lapso será máximo y puede ser expresado por:

$$t_{lc} = (L / \cos \theta) / (c / n_1) = (L n_1) / (c \cos \theta) \quad (\text{Lapso máximo de propagación}).$$

Ecuación 1.15

La diferencia entre el lapso corto y el lapso largo de propagación es el tiempo durante el cual el pulso de energía llegará a la salida de la fibra y representa el ensanchamiento del pulso de salida. Usando las ecuaciones 1.14, 1.14 y 1.15 se tiene una expresión para este pulso ensanchado  $\Delta t$ :

$$\Delta t = (t_{lc} - t_{lc0}) = (L n_1 / c) \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente y  $c$  es la velocidad de la luz.

La figura 1.17 ilustra  $t_{lc}$  lapso para el modo crítico,  $t_{lc0}$  lapso para el modo cero, y  $\Delta t$  que es la dispersión o ensanchamiento del pulso. Como  $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ , (Índice de refracción relativo), para  $\Delta \ll 1$ , el denominador puede ser  $n_1$  o  $n_2$ , entonces:

$$\Delta t = (L n_1 / c) \Delta \quad \text{Ecuación 1.17}$$

No confundir  $\Delta$  la diferencia refractiva relativa con  $\Delta t$  que es la dispersión o ensanchamiento del pulso.

Se puede expresar  $\Delta t$  en términos de la apertura numérica N.A.

$$\Delta t = (L (N.A.)^2) / (2n_1 c) \quad \text{Ecuación 1.18}$$

### 1.7.7.- Dispersión intramodal.

La dispersión intramodal, algunas veces llamada dispersión cromática es resultado directo de la acción de la luz en la fibra. Un pulso luminoso está compuesto con la luz de diferentes longitudes de onda, dependiendo del ancho espectral de la fuente luminosa. Debido a que en las fibras ópticas están construidas de vidrio, y que este es un material dispersivo que cambia su índice de refracción en función de la longitud de onda, por consiguiente, si la longitud de onda varía, hay diferentes velocidades de propagación en el material, así por ejemplo un pulso de energía que va de 820 a 850 nm (30 nm), la parte de los 820 nm es más lenta que en la parte 850 nm, produciendo un efecto de pulso ensanchado. Para un pulso con  $\lambda$  alrededor de 1300 nm la situación es contraria, la parte  $\lambda = 1320$  nm es más rápida que la parte  $\lambda = 1350$  nm, otra vez produciendo un pulso ensanchado. Para un pequeño incremento cercano a  $\lambda = 1300$  nm, la parte corta larga y la parte corta viajan aproximadamente igual a la misma velocidad, esto ocasiona mínima dispersión intramodal. Las longitudes de onda alrededor de 1300 nm son muy interesantes debido a la baja dispersión del material. La dispersión cromática limita el ancho de banda de la fibra óptica y puede ser reducida usando luz monocromática por ejemplo diodos láser.

La dispersión intramodal ó cromática se puede calcular :

$$t_{\text{cromática}} = K \Delta \lambda \approx 0.1 \Delta \lambda \text{ (ns / km)} \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Donde  $\Delta \lambda$  es el ancho espectral de la fuente de luz, K es una constante,  $K = 0.1$  ns / nm km a una longitud de onda de 850 nm. El valor de K disminuye cuando aumenta la longitud de onda hasta  $\lambda = 1300$  nm donde  $K \approx 0$  y luego aumenta otra vez.

### 1.8 Ancho de banda en las fibras ópticas.

El ancho de banda en la fibra es un parámetro que nos indica la capacidad de transmisión de información, para determinar se debe tomar en cuenta la dispersión modal e intramodal, el perfil del índice de refracción y las microcurvaturas que sufre la fibra en su uso y / o durante la instalación.

Las técnicas de fabricación de las fibras ópticas imponen un ancho de banda ilimitado.

## CAPITULO II.

### Fabricación de fibras ópticas

#### 2.1. Generalidades.

Aproximadamente la mitad (en peso) de la corteza terrestre sólida está compuesta por oxígeno y una cuarta parte, por silicio. La abundancia de ambos elementos debe a que la corteza terrestre está formada principalmente por cuarzo y sus compuestos con óxidos metálicos. El cuarzo, que en su carácter de compuesto químico se denomina dióxido de silicio  $\text{SiO}_2$ , aparece por lo general en forma de cuarzita como componente de la arena.

En general, la elaboración de vidrio de cuarzo de alta pureza tiene lugar separando  $\text{SiO}_2$  mediante la reacción química siguiente:



Se elige el proceso indirecto por medio de  $\text{SiCl}_4$ ; pues en contra posición con  $\text{SiO}_2$  natural, mediante destilación es posible obtener este compuesto con un alto grado de pureza. Actualmente se fabrican los conductores de fibra óptica utilizando este proceso.

Un factor muy importante para la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica es, según se sabe, el índice de refracción  $n$  del vidrio. Este se puede ajustar por medio de un adecuado dopado o sea agregando determinados óxidos durante la preparación de la fase gaseosa. Por ejemplo, agregando flúor F o trióxido de boro  $\text{B}_2\text{O}_3$  se obtiene un índice de refracción bajo y al agregar dióxido de germanio  $\text{GeO}_2$  o pentóxido de fósforo  $\text{P}_2\text{O}_5$ , un índice más alto.

#### 2.2 Métodos de fabricación de fibras ópticas.

La fabricación de fibras ópticas de vidrio se realiza básicamente por dos tipos de procedimiento: De los crisoles y preforma. El primero se usa para aplicaciones de alto alcance y/o bajo flujo de información, mientras que el segundo es aplicado en el campo de las telecomunicaciones.

##### 2.2.1 Método de los dos crisoles o Compound melting.

En este método de fabricación de los vidrios correspondientes al núcleo y al revestimiento son unidos en estado de fusión y luego se estira la fibra de este material directamente al salir del estado de fusión. El método recibe este nombre ya que los vidrios que se utilizan para el núcleo y el revestimiento se funden en crisoles separados. Se utilizan vidrios de alta pureza con varios componentes como por ejemplo silicato alcalino de plomo y borsilicato sódico. Este método de producción se utiliza especialmente para la fabricación de conductores de fibra óptica con núcleo de gran diámetro.

También se pueden fabricar conductores de fibra óptica con perfil gradual por difusión o intercambio de iones entre los vidrios del núcleo y del revestimiento (método de Solfoc).



### 2.2.2 Método preforma.

La fabricación de fibras ópticas de la preforma, que es la más utilizada comprende dos etapas:

- La fabricación de la preforma propiamente dicha.
- El estiramiento de la preforma, de la cual se obtiene la fibra.

Exteriormente las preformas tienen el aspecto de un cilindro macizo de vidrio de 1 a 2 metros de largo y 10 a 20 mm de diámetro. Sus características macroscópicas son equivalentes a las de las fibras ópticas que de ellas se obtiene por estiramiento.

Las diferencias tecnológicas radican básicamente en la fabricación de las preformas. La fase de estiramiento puede ser similar con preformas fabricadas por métodos diferentes.

### 2.2.3 Métodos de fabricación de preformas.

Los métodos más usados para fabricar preformas de vidrio para fibras ópticas de alta calidad son:

- Método VAD ( Vapour-phase Axial Deposition ).
- Método OVD ( Outside Vapour Deposition).
- Método MCVD ( Modified Chemical Vapour Deposition).
- Método PCVD ( Plasma Chemical Vapour Deposition).

Sólo con los diferentes procesos de deposición a partir de la fase gaseosa (Vapour Deposition) se logró fabricar conductores de fibra óptica, la deposición se produce por medio de la descomposición de compuestos volátiles de alta pureza en una llama de gas detonante. En la fabricación de la preforma, se atribuye, por un lado gran importancia a la mejora de la velocidad de deposición es decir la masa de las partículas depositadas por minuto y por el otro se procura aumentar el tamaño de la preforma para obtener de cada una de ellas longitudes cada vez más grandes.

### 2.2.4. Método VAD.

La principal diferencia con otros métodos es que el crecimiento de la preforma se realiza en la dirección axial (figura 2.1). Partiendo de una varilla rotante de vidrio de cuarzo dispuesta perpendicularmente, se inyectan ( mediante soplete en su extremo inferior ), las materias primas.

Las materias primas dopantes, estas reaccionan hasta formar finas partículas de vidrio (Hidrolisis a la llama) y los productos se depositan en el orden y proporción adecuada al perfil de índice deseado. El crecimiento da lugar a una preforma porosa que, sometida a un calentamiento localizado, se contrae hasta formar la preforma definitiva. La deposición de vapores se realiza a 1400 -1500 °C y la consolidación a la preforma definitiva se realiza a 1800-2000 °C. Ambas fases se realizan simultáneamente. La preforma definitiva tiene unos 10 mm de diámetro. Aunque se han realizado algunas que han producido 200 Km de fibra, las dimensiones típicas de preformas producen de 10 a 20 Km de fibra.

El crecimiento es el orden de 0.4 g/min. y la contaminación por agua puede reducirse por debajo de 0.05 p.p.m.

La posición de la llama es muy importante para ajustar el perfil (un perfil próximo al óptimo se obtiene con una inclinación del mechero próxima a los 45°). El ajuste fino del perfil se controla variando la proporción de H<sub>2</sub> u O<sub>2</sub> en la llama. Para fabricar fibras monomodo (una modalidad de propagación) suelen usarse dos mecheros; uno para el núcleo y otro para el revestimiento.

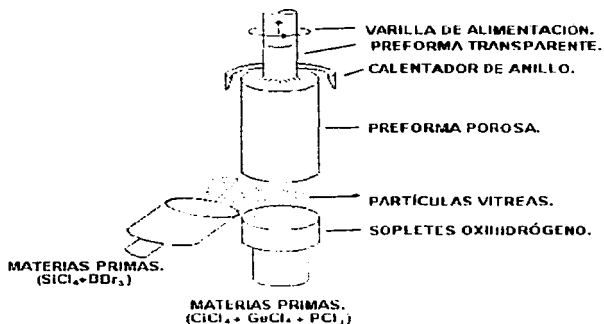


FIGURA 2.1. Metodo VAD.

### 2.2.5 Método OVD.

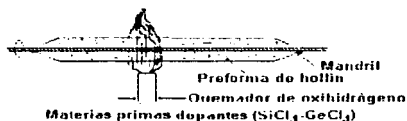
En este método la preforma se realiza en dos fases: deposición de los óxidos y sintetización o colapsado. En la primera (figura 2.2), los vapores se depositan lateralmente, sobre un mandril de grafito o de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de unos 5 mm de diámetro y que gira a una velocidad constante, la llama se va trasladando a lo largo del mandril produciendo, durante diversas idas y venidas, las capas vitreas que darán lugar al perfil de índice deseado. Acabado este proceso se retira el mandril, aprovechando el diferente coeficiente de dilatación respecto al vidrio depositado y se realiza el proceso de sintetización. El proceso de sintetización o colapsado de la preforma en estado poroso, se realiza introduciéndola en un horno a 1500 °C, en una atmósfera de helio con un pequeño porcentaje de Cl<sub>2</sub> con objeto de eliminar la contaminación de grupos OH.

Con el método de OVD se han realizado preformas equivalentes a 40 Km de fibra y un crecimiento medio de 1.8 g/min para el núcleo y 6 g/min para el revestimiento. En

producción normal las preformas típicas proporcionan unos 10 - 13 Km de fibra, con velocidades medias de crecimiento de 0.7 a 1.3 g/min.

En estas fibras el índice gradual, del núcleo esta compuesto de unas 1000 capas finas de vidrio. Por lo que respecta a las fibras monomodo, una ventaja de este método es la relativa insensibilidad de la atenuación de la fibra con la velocidad de crecimiento de la preforma.

Proceso de descomposición de los dopantes



Proceso de síntesis

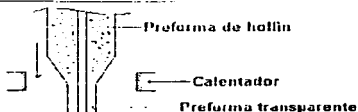


Figura 2.2 Metodo OVD.

2.2.6 Metodo MCVD.

Las líneas generales de este método se esquematizan en la figura (2-3). El proceso parte de un tubo de sílice muy puro en el que se va depositando  $\text{SiO}_2$  junto con otros óxidos dopantes, procedentes de haluros evaporados, cuyas concentraciones y flujos se controlan mediante la circulación de oxígeno por los respicientes que continen dichos haluros en fase líquida a temperatura constante. El tubo de sílice se calienta con unos mecheros que circulan de izquierda a derecha. En la zona calentada por los mecheros 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 formación de finas capas de  $\text{SiO}_2$  convenientemente dopadas. La velocidad de deposición es tanto mayor cuanto más grande es la diferencia de temperatura del gas entre la zona de equilibrio y las paredes del tubo de sílice. Por consideraciones prácticas no es conveniente sobrepasar velocidades de crecimiento superiores a 1 g/min. Además, cuanto mayor es el espesor de las sucesivas capas de vidrio que constituyen el núcleo de la preforma menos preciso es el perfil del índice, imposibilitando obtener fibras multimodo de elevada anchura de banda.

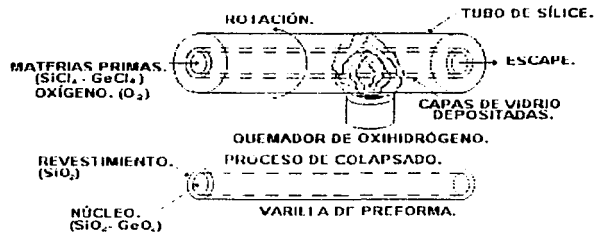


FIGURA 2.3 METODO MCVD.

En condiciones especiales se han podido fabricar preformas equivalentes a 40 Km de fibra. En condiciones normales de fabricación, las preformas equivalen a 10 ó 14 Km de fibra, con velocidades de crecimiento de 0.4 g/min y eficiencias del 50%, en la deposición del  $\text{SiO}_2$  y del 10-20% en la del  $\text{GeO}_2$ .

Recientemente, se ha desarrollado una modificación de ese proceso, denominada PMCVD, que permite crecimiento de 5g/min con eficiencias de deposición del 80% para el  $\text{SiO}_2$  y para el  $\text{GeO}_2$ . Esta variante, la PMCVD, se está perfeccionando para fabricar fibras monomodo de menores atenuaciones.

Una vez depositado el material del núcleo (bien por el método MCVD y por su variante PMCVD) se eleva la temperatura del mechero a 1900 °C debido a la tensión superficial, el tubo se colapsa y se forma el cilindro macizo de vidrio que constituye la preforma.

### 2.2.7 Método PCVD.

El método PCVD realiza una deposición en el interior de tubos de sílice. Se diferencia del PMCVD, en que utiliza un plasma para iniciar la reacción de los gases. El proceso se esquematiza en la figura 2.4. Un sistema inyecta las materias primas en forma de gas y este se mantiene en una presión de unos 10 Torr dentro del tubo de sílice, el cual se mantiene dentro de un horno a unos 1200 °C. Dentro de dicho horno se instala un oscilador de microondas que se desplaza de izquierda a derecha (a unos 7 u 8 m/min) sobre una longitud de 1 m. La energía radiofrecuencia, de 2GHz, genera un plasma dentro de un 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  $\text{SiO}_2$  y del 85% para el  $\text{GeO}_2$ . Finalizada la deposición del núcleo tiene lugar el colapso a unos 2000 °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 este modo el oscilador 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 bien ajustado; es posible así lograr fibras con un perfil de índice muy próximo al deseado.

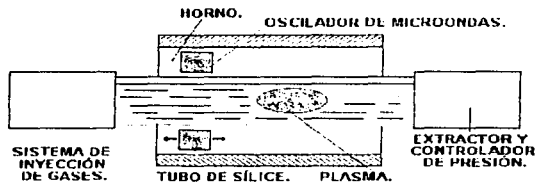


FIGURA 2.4 MÉTODO PCVD.

### 2.3 Estiramiento de la preforma.

Realizada la preforma, la siguiente etapa es el estiramiento, que se realiza mediante una técnica cuyo esquema básico se muestra en la figura (2.5).

La varilla de preforma (realizada por cualquiera de los anteriores métodos) se introduce en el horno que está a una temperatura del orden de 2000 °C en su centro, requiriendo una estabilidad de  $\pm 1^\circ\text{C}$  a fin de reducir las fluctuaciones en el diámetro de la fibra óptica. La velocidad de estirado (valor típico 200 m/min) y la del dispositivo de avance se deben ajustar exactamente por medio de un circuito de regulación para obtener una fibra cuyo diámetro se mantenga constante en el valor requerido.

Una vez que sale del horno, la fibra pasa por un control de diámetro que debe ser capaz de resolver discrepancias de  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ , si bien el margen más corriente de aceptación se haya entre  $3 \mu\text{m}$  y  $6 \mu\text{m}$ . Cualquier alejamiento del margen que se establece, detiene el proceso a través del circuito de realimentación, paralizando el cabrestante que origina la tensión de estiramiento.

A continuación, detrás del detector de diámetro se aplica en torno a la fibra recubrimiento primario; la envoltura de plástico delgado que protege al conductor contra microcurvaturas, mejora su resistencia y facilita su manejo. Cuando el recubrimiento primario se ha endurecido por efecto del calor o radiación UV, el conductor de fibra óptica es sometido al ensayo continuo de resistencia a la tracción, haciendo pasar a la fibra con su recubrimiento primario por un oscilador que ejerce sobre el mismo una tracción mecánica ajustable con gran presión. El conductor de fibra óptica debe resistir esta carga mínima antes de ser arrollado en un tambor cilíndrico.

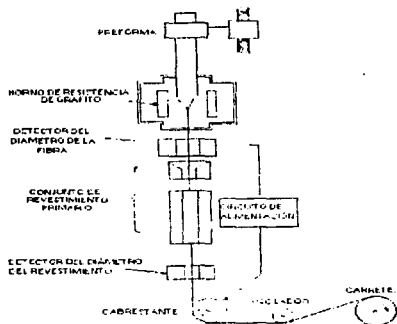


FIGURA 2.5 ESTIRAMIENTO DE LA PREFORMA.

## CAPITULO III

### COMPONENTES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

#### INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se analiza, según su uso, a las fibras monomodo, las cuales se aplican en enlaces de larga distancia y/o gran flujo de información, enlaces submarinos y enlaces interurbanos. Y a las fibras multimodo las cuales se emplean en enlaces telefónicos urbanos, transmisión de T.V. digital, distribución de señales de T.V. y transmisiones de datos.

Habrá que diferenciar entre las fibras con índice y revestimiento de vidrio ( $\text{Si O}_2$ ) y las fibras con núcleo de vidrio y revestimiento de plástico. Estas últimas son particularmente resistentes a las radiaciones y pueden ser idóneas para aplicaciones militares. Así mismo habrá que mencionar las fibras con núcleo de plástico que representan pérdidas de varios cientos de db/Km y se aplican sobre distancias de pocos metros: medicina, automóviles, instrumentación.

Por otra parte se exponen varios tipos de cables de fibras ópticas con el objeto de conocer la estructura mecánica de los cables de una fibra y multifibra, así como sus características.

#### 3.1 Tipos de fibras ópticas y parámetros característicos

Ningún diseño de fibras puede cubrir todas las necesidades de las aplicaciones. Principalmente por razones de índole económica, los fabricantes se han concentrado en tres grandes clases:

- Fibra tipo multimodo índice escalón.
- Fibra tipo multimodo índice gradual.
- Fibra tipo monomodo índice escalón.

- Fibra multimodo índice escalón.

Sus características son, de moderada a alta N.A., mayor diámetro en el núcleo, alta atenuación y bajo ancho de banda. Permite acoplar mayor potencia debido al mayor diámetro del núcleo y de la N.A..

- Fibra multimodo índice gradual.

Este tipo de fibra ofrece una buena aceptación de luz y una característica de ancho de banda que es en orden superior al de la fibra multimodo de índice escalón. Otras características son diámetro moderado del núcleo, baja N.A. y atenuación moderada.

• Fibra monomodo índice escalón.

En esta clase de fibra el diámetro del núcleo es tan pequeño que sólo existe un modo de propagación. Además de tener un núcleo muy pequeño se caracteriza por tener baja N.A., baja atenuación y alto ancho de banda.

La estructura típica de estas tres clases de fibra se muestra en la figura 3.1

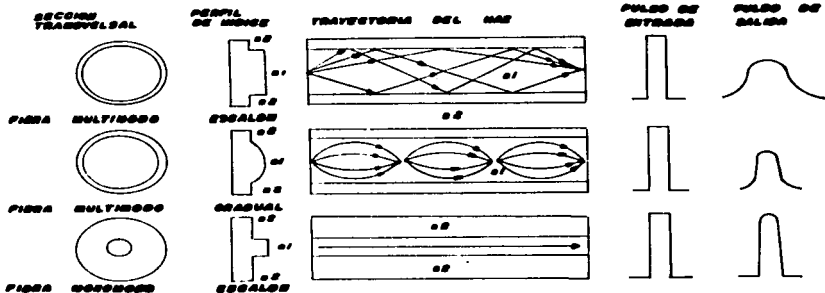


FIGURA 3.1 TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS.

Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica multimodo con perfil escalonado.

Diámetro del núcleo	$2a$	100 $\mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	$D$	140 $\mu\text{m}$
índice de refracción del núcleo	$n_1$	1.48
índice de refracción del revestimiento	$n_2$	1.46

Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica con perfil gradual

Diámetro del núcleo	$2a$	50 $\mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	$D$	125 $\mu\text{m}$
índice de refracción máximo en el núcleo	$n_1$	1.46
Diferencia de índices de refracción		0.01



Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica monomodo con perfil escalonado

Diámetro del núcleo	$2w_0$	10 $\mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	D	125 $\mu\text{m}$
Índice de refracción del núcleo	$n_1$	1.46
Diferencia de índices de refracción		0.003

### 3.2 Cables de fibras ópticas

QUERSTA PROTECTORA  
RECUBRIMIENTO SECUNDARIO  
AIRE O PETROLATO  
RECUBRIMIENTO PRIMARIO  
REVESTIMIENTO  
NÚCLEO

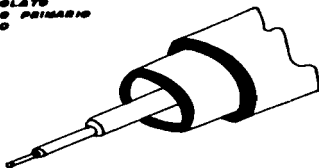


FIGURA 3.2 ESQUEMA DE CABLE DE FIBRA ÓPTICA CON TUBO SUELTO.

La típica fibra de vidrio es de aproximadamente 100 - 250  $\mu\text{m}$  en diámetro. Es frágil y altamente susceptible a daños tales como rotura o rasgados. Debido al pequeño tamaño de la fibra este daño puede apreciablemente aumentar la radiación hacia el exterior a través del revestimiento y por lo tanto, incrementar pérdidas. Es obvio que no se puede usar la fibra desnuda. Ella debe ser protegida.

La protección exterior tiene las siguientes características:

- Proporciona fuerza a la estructura mecánica
- Protege a la fibra contra el rompimiento y daño
- No introduce excesiva presión a la fibra. Tal presión puede causar microdoblamientos y aumentar pérdidas.
- Permite fácil instalación y mantenimiento
- Protege a la fibra de condiciones ambientales, lo cual es especialmente importante en instalaciones bajo el agua.

### 3 3 Cables de una fibra

Como parte del proceso de manufacturación, la fibra recibe un recubrimiento delgado de plástico en adición al revestimiento de la fibra, para protegerla contra daño durante la manufactura y ensamblado. La fuerza mecánica y la protección adicional son usualmente proporcionadas mediante forros de plástico pesado. Es importante darse cuenta que la estructura mecánica varía con la aplicación. Por ejemplo, cables bajo el agua tienen sellos adicionales para prevenir la corrosión y estructuras especiales para soportar la alta presión.

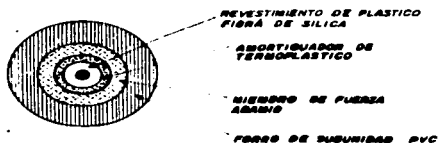
También la fibra en particular encasillada en la estructura mecánica puede ser una fibra de índice escalón, índice gradual, monomodo u otra fibra adecuada.

Los cables de una fibra están construidos en dos formas básicas: amortiguador suelto (tubo suelto) y amortiguador apretado.

Amortiguador suelto significa que la fibra está libre de cualquier presión, es colocada en cualquier encierro vacío. Las figuras 3 3 y 3 4 muestran dos cables de amortiguador suelto (para referencia, cada figura incluye la hoja de datos completos con especificaciones relevantes). Como usted puede ver, la fibra (el punto negro en la figura 3 3) está libre para moverse dentro del tubo amortiguador (o tubo primario). Esta construcción libre de presión reduce los efectos de microdoblamiento.

Una ventaja del cable con tubo suelto es la facilidad con que se puede desaislar para efectuar empalmes o conexiones y resulta muy útil cuando se prepara un empalme o se coloca un conector. Pero bajo determinadas condiciones ambientales existe la posibilidad de que, ante un rasgado de la protección exterior, penetre humedad en el encierro vacío (hueco), ocasionando pérdidas por absorción. Entonces, para evitarlo se procede a rellenar el espacio vacío con una sustancia adecuada, químicamente neutra que, en el rango de temperatura de  $-30^{\circ}$  a  $+70^{\circ}$  no se congela ni se escurre fuera del cable.

### 1.- Fibra PCS cable de una fibra



#### Información de la fibra

Diámetro del núcleo  
 Diámetro del revestimiento  
 Diámetro del amortiguador  
 Material del revestimiento

#### Fibra silica revestimiento de plástico

200 µm  
 300 µm  
 900 µm  
 Silicón

#### Información del cable

Diámetro del cable (mm)  
 (in)  
 Peso del cable (Kg/Km)  
 (lbs/100)

2.4  
 0.09  
 5.5  
 (3.7)

#### Desempeño de la transmisión

Atenuación (db/Km) Máxima a 800 nm  
 Mínima a 800 nm

10.0  
 10

#### Especificaciones mecánicas

Carga de tensión máxima  
 Durante la instalación periodo corto  
 Después de instalada periodo largo  
 Resistencia de compresión  
 Resistencia a impacto

300 N(67.51 lbs)  
 150 N(33.71 lbs)  
 2000 N/cm(1143 lbs/in)  
 200 ciclos

#### Especificaciones ambientales

Temperatura de almacenado  
 Temperatura de operado  
 Resistencia a las llamas

-40 a +70°C  
 -20 a +70°C  
 UL - 1666

**FIGURA 3.3 DIAGRAMA Y HOJA DE DATOS PARA CABLE DE UNA FIBRA- AMORTIGUADOR SUELTO.**

- Cable de una fibra
- Estructura tubo suelto
- Baja atenuación sobre la fluctuación de temperatura
- Fuerza tensiva alta
- Dieléctrico
- Paso forro ULVW-1 a prueba de flama



REMI O P/N	Diámetro de la fibra Núcleo/Revestimiento $\mu\text{m}$	NA	Desempeño óptico			
			@ 850 nm		@ 1300 nm	
			db/Km <sup>2</sup>	MHz-Km <sup>3</sup>	db/Km <sup>2</sup>	MHz Km <sup>3</sup>
20 01 1 354 154	50/125	0 20	3 5	400	1 5	400
20 01 1 000 106	50/125	0 20	---	---	1 0	600
20 01 1 402 202	85/125	0 26	4 0	200	2 0	200
20 01 1 501 301	100/140	0 29	5 0	100	3 0	100
20 01 1 503 303	100/140	0 29	5 0	300	3 0	300
20 01 1 800 (XX)	200/380	0 30	8 0	20	---	---

#### Especificaciones Mecánicas

Numero de fibras		1
Diámetro del amortiguador	$\mu\text{m}$	250/500
Diámetro del tubo	mm	2 0
Fluctuación de temperatura de almacenado	$^{\circ}\text{C}$	-40 <sup>o</sup> - +70 <sup>o</sup>
Fluctuación de temperatura en operación instalada	$^{\circ}\text{C}$	-20 <sup>o</sup> - +70 <sup>o</sup>
Carga tensiva máxima para instalación	N (lbf)	500 (110)
Carga tensiva máxima para instalaciones de largo periodo	N (lbf)	100 (22)
Radio de doblado máximo (para instalación)	cm (in)	10 0 (4 0)
Radio de doblado máximo (instalación flojeada (libre))	cm (in)	5 0 (2 0)
Resistencia a la compresión	N (cm)	600
Resistencia al impacto	veces/Nm	50 x 1 0
Doblamiento 90 <sup>o</sup>	veces	10 000
Diámetro exterior del cable (nominal)	mm (in)	4 0 (0 157)
Peso del cable (nominal)	Kg/km lb/1000 ft	13 (8 7)

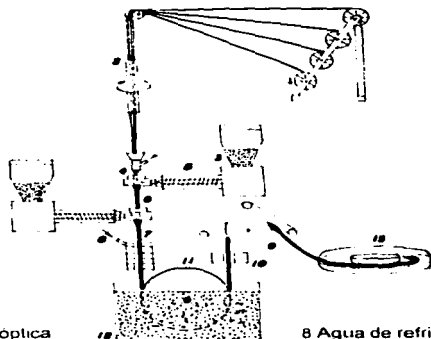
**FIGURA 3.4 HOJA DE DATOS PARA UN CABLE DE FIBRA ÓPTICA, ÍNDICE ESCALÓN CON AMORTIGUADOR SUELTO.**

### 3 2.1 Fabricación.

Para el proceso de fabricación se trabaja con dos extrusoras dispuestas en tándem, las que en un proceso continuo elabora la protección exterior, formada por un tubo primario y otro secundario. Para garantizar que los espesores de las paredes de los tubos (capas) tengan los valores requeridos, solamente algunas décimas de milímetro, es necesario contar con mecanismos de maniobra y control de funcionamiento exacto para extruir (montar) los materiales que formarán la protección exterior de modo uniforme a unos 250°C. Figura 3.5

La ventaja de esta protección exterior de dos tubos frente al de uno solo radica en la mayor libertad para elegir los materiales y sus posibilidades de combinación, las que pueden solucionar con mayor eficiencia los problemas térmicos y mecánicos. Durante la producción de la protección exterior, se inyecta, con una aguja y a presión constante, la sustancia químicamente neutra, que no debe tener inclusiones de aire ni de otras sustancias extrañas.

En este proceso, la coordinación de las longitudes exactas, tanto del cable con tubo suelto como de las fibras ópticas, es el principal punto que se debe tener en cuenta. Los enrollados convencionales, como los usados para conductores de cobre, no sirven para enrollar cables con tubo suelto. Las razones son, por una parte, su reducida capacidad, por la otra, el que pueden deslizarse diferentes capas, unas encima o debajo de otras, provocando condiciones indefinidas de compresión entre los cables con tubo suelto, con su consiguiente deterioro. Además, este tipo de enrollado no permitiría lograr una exacta coordinación de longitudes entre conductor de fibra óptica y protección exterior. Por los motivos expuestos se efectúa el enrollado de estos cables en platos o tambores, de gran capacidad para arrollar en ellos hasta varios kilómetros de cable, colocados en forma horizontal directamente al lado de la máquina que produce los conductores.



- 1 Conductor de fibra óptica
- 2 Cableado de las fibras
- 3 Granulado de plástico
- 4 Relleno inyectable
- 5 Tornillo sin fin
- 6 Primera capa
- 7 Segunda capa

- 8 Agua de refrigeración
- 9 Salida
- 10 Verificación del diámetro
- 11 Polea de reenvío
- 12 Pileta de enfriamiento
- 13 Plato de enrollado

**FIGURA 3.5 ESQUEMA DE FABRICACIÓN DEL CABLE CON TUBO SUELTO PARA GRUPOS DE FIBRA (EXTRUSORA)**

### 3.3 Cables de fibra óptica con amortiguador apretado

La figura 3.6 presenta un cable típico de amortiguador apretado. Otra vez la figura incluye la hoja de datos completos. Aquí la capa amortiguador está montada justamente encima del recubrimiento primario.

#### Fabricación

Encima del revestimiento primario de la fibra óptica, se aplica en forma directa, a 250°C utilizando el método del estiramiento del tubo, la capa protectora interior con efecto amortiguante de poliarnida, polipropileno, o elastómero de poliéster.

Para aplicar la protección exterior al conductor de fibra óptica existe, en forma similar que los conductores huecos, un procedimiento vertical y otro horizontal.

### Guía general-cable SX/Simplex fibra óptica amortiguador apretado

#### Construcción del cable

Fibra óptica -una fibra multimodo- índice gradual de vidrio

Diámetro del núcleo - 50  $\mu\text{m}$  (0.002")

Diámetro del revestimiento - 125  $\mu\text{m}$  (0.005")

Recubrimiento primario - diámetro por todo

500  $\mu\text{m}$  (0.020")

Material amortiguador justo de nylon -

Diámetro de 950  $\mu\text{m}$  0.37"

Miembro de fuerza - Kevlar

Forro exterior - forro PVC diámetro 2.8 mm (0.11")

#### Desempeño óptico

Apertura numérica N.A. =  $0.20 \pm 0.015$

Atenuación - 4, 5 o 6 db/Km a 850 nm -

desempeño de longitud de onda

2 db/Km a 1300 nm longitud de onda

Anchura de banda - 200, 400, 600 u

800 MHz

Cables estándar

Parte N°

4 db - 200 MHz en 850 nm 1-801402 PC

2 db - 400 MHz en 1300 nm 3-801204 PC

Cualquier combinación de atenuación y ancho de banda, disponible bajo solicitud

#### Desempeño mecánico

Máxima tensión recomendada 510 N (1001 lbs)

Máximo doblado de radio recomendado 25 mm (1 pulgada)

La guía general - cable SX encuentra las pruebas de norma aceptables para la temperatura, impacto, flexibilidad y compresión como las especificaciones generales del cable 8005 - NM

#### Empaquetado

Longitud estándar - 1 Km

Tamaño del carrete - aro proyectado O.D.

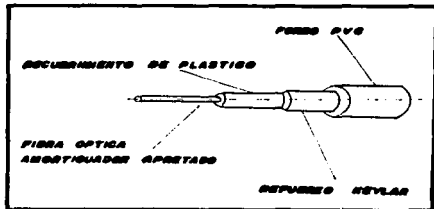
16", atravesado 6" - tambor 6"

Peso de envío - aproximadamente 18 lbs.

Información para el pedido de guía general

Cantidad - atenuación - ancho de banda - número de parte.

Los datos completos del producto están disponibles mediante la solicitud de especificaciones.



**FIGURA 3.6 DIAGRAMA Y HOJA DE DATOS PARA LA GUÍA GENERAL DEL CABLE SX AMORTIGUADOR APRETADO**

### 3.4 Cables multifibras

En grandes instalaciones, es común usar muchas fibras contenidas en un cable reforzado, muy parecido al cable de cobre de muchos alambres en uso convencional. La estructura de estos cables de fibra óptica está basada en el uso del cable elemental de una sola fibra.

La figura 3.7 muestra un número de cables de amortiguador suelto (algunas veces llamado tubo suelto/holgado) combinados dentro de un cable multifibras. Las capas exteriores son necesarias para proteger las fibras.

Mientras que la figura 3.7 muestra una estructura de amortiguador suelto, la misma configuración básica es usada en una estructura de cable de amortiguador apretado. Si los tubos de fibra individual son repuestos con cables de amortiguador apretado, usted obtiene un cable multifibras que utiliza una estructura de amortiguador apretado.

#### 3.4.1 Diseño del cable multifibras.

La confiabilidad de los cables de fibra óptica mejora sosteniendo las fibras en condiciones libres de esfuerzo, compresión. Para lograr alta confiabilidad, los cables utilizan un diseño de amortiguador suelto. Cada fibra óptica es mecánicamente aislada, suelta dentro de una capa interior de mayor tamaño. Esto permite una considerable expansión y contracción del cable, protege de los cambios de temperatura o cargas mecánicas antes que cualquier esfuerzo sea aplicado a fibras, minimizando las pérdidas. También, cuando esfuerzo local es aplicado, la fibra se acomoda desliziéndose dentro del forro secundario para alcanzar el nivel de esfuerzo más largo posible.

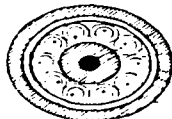


SIECOR 612/622 y 012/022 son cables de fibra óptica de gran capacidad para usarse en la transmisión de datos y telecomunicaciones. Estos cables de alto desempeño han mejorado las especificaciones, simplificado la construcción y han bajado los costos.

Baja atenuación - proporción alta de datos  
 Repetidora extendida espaciada.  
 Bajo costo por canal.  
 Capacidad graduable hacia arriba.

Tamaño, peso, flexibilidad.  
 Bajo costo de instalación.  
 Mínimos requeridos en ductos.

Conductor sílica.  
 Inmunidad a la interferencia.  
 Aislamiento/sin corte.  
 Sin afectación por el agua.  
 Durable químicamente.



- ALAMBRE DE ACERO
- AMORTIGUADOR DE POLIURETANO
- FORRO AMORTIGUADOR
- RIVETE
- REFUERZO KEVLAR
- POLIURETANO

- ALAMBRE DE ACERO
- AMORTIGUADOR DE POLIURETANO
- FORRO AMORTIGUADOR
- RIVETE
- REFUERZO KEVLAR
- POLIURETANO

Cables SIECOR 622 y 022 están proporcionados a 6 db/Km y 400 MHz /Km, o mejor en el medio de operación.

Cables 612 y 012 tienen atenuación menor que 10 db por Km y anchura de banda mayor que 200 MHz en un kilómetro. Pueden manejar altas proporciones de datos incluyendo telefonía (672 canales de voz) sobre largas distancias sin repetidoras

El empalmado puede realizarse en campo y se lleva de largo como la unión de cables coaxiales de tamaño similar, sin embargo empalmes en menor cantidad son requeridos con cables SIECOR.

Cables SIECOR son convenientes para uso interior y exterior.

**FIGURA 3.7 DIAGRAMA Y HOJA DE DATOS PARA UN CABLE MULTIFIBRAS**

### 3.4.2 Construcción del cable multifibras.

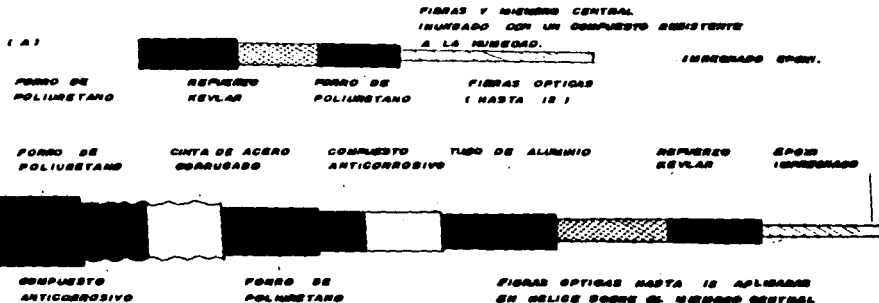
Cada fibra está rodeada por un fuerte forro amortiguador de doble capa que protege a la fibra contra fuerzas de impacto y de compresión. El forro amortiguador es flexible, resiste la breña y puede ser fácilmente retirado mecánicamente para el empalmado y terminado.

Los forros amortiguadores están encallados alrededor de un cierto miembro, un alambre de acero recubierto con poliuretano, formando el núcleo del cable. Una capa de aramid se enreda alrededor del núcleo para protección adicional y acojinamiento y proporciona la fuerza tensiva del cable. Una envoltura exterior de poliuretano completa la construcción del cable. El poliuretano es flexible pero soporta la abrasión y raspado y también resiste el ataque químico y el rompimiento.

Una estructura de un cable multifibras diferente se muestra en la figura 3.8. Aquí las fibras están encordadas en forma de hélice alrededor de un soporte central, con capas protectoras adicionales cubriendo la fibra y el miembro central; el cable mostrado en la figura 3.8 b es reforzado pesadamente y protegido contra la corrosión. Esta protección extra es a menudo necesaria contra el ataque de roedores. Roedores, tales como las ardillas, tienden a morder los cables y causar rompimientos a través de alguna de sus capas de plástico. La protección extra es también necesaria para protegerla contra ambientes corrosivos tales como las playas de mar o ductos bajo la superficie.

Típicamente, los sistemas de fibra óptica requieren de alambres de cobre así como de fibras. Estos a veces son incorporados dentro del cable multifibras. La figura 3.9 presenta alguna de las combinaciones de alambres de cobre-fibras que están ahora disponibles en la forma de cable.

Las características eléctricas y ópticas de un cable dependen en las fibras particulares usadas. Otras características tales como la fuerza mecánica y otras propiedades mecánicas son también importantes.



**FIGURA 3.8 ESTRUCTURA DE CABLE.**  
(a) cable simple tipo NM, (b) tipo reforzado



**FIGURA 3.9 FOTOGRAFÍA DE UNA VARIEDAD DE ESTRUCTURAS DE CABLES DE FIBRA ÓPTICA;  
ALGUNOS CONTIENEN ALAMBRE DE COBRE.**

## CAPÍTULO IV

### EMPALMES Y CONECTORES

#### 4.1 Introducción

Los sistemas de transmisión de fibra óptica contienen diferentes componentes individuales como el **empalme**, que une permanentemente dos fibras; el **conector** que une una fibra con otra, con los transmisores o los receptores en una forma desmontable.

En este capítulo se expone la manera en que varios tipos de empalmes están contruidos y ensamblados. Usted será capaz de seguir las instrucciones de empalmes específicos dados por manufacturadores de empalmes.

Además será introducido a reconocer varios tipos de conectores y su ensamblado sobre la fibra. Por otra parte, se analizan las pérdidas producidas por desalineo o mal apareamiento tanto en empalmes como en conectores. Finalmente se incluyen algunos métodos para la medición de la atenuación.

#### 4.2 Proceso de empalmes

Cuando su alambre intercomunicador se rompe, usted puede torcer el borde o soldarlo. En el caso de las fibras ópticas, ya sea que se vayan a reparar o a extender el enlace óptico, se debe empalmar los dos bordes de la fibra, permaneciendo juntas las terminales de dichas fibras. El proceso de empalme debe de hacerse de tal manera que no se introduzcan pérdidas excesivas. Si los bordes no están alineados de una manera correcta, la luz se escapará en el punto de unión, teniendo como resultado la pérdida de potencia. Además la conexión debe ser confiable por un largo plazo. No debe tener que empalmarse cada seis meses.

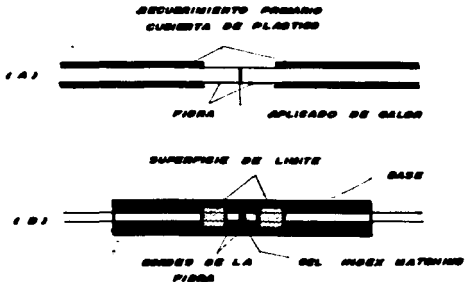
Para realizar un empalme de calidad, las puntas de la fibra deben ser cuidadosamente cortadas. Esto es, el corte debe ser perpendicular a lo largo de la fibra. Por sus características, algunos métodos de corte producen un terminal limpio y listo para usarse. Otros requieren pulir antes el borde de la fibra.

Toda la preparación y unión de las fibras, debe de hacerse tan rápido como sea posible. Una demora conduciría a la acumulación de polvo, causando así pérdidas adicionales de luz en el empalme.

Para alcanzar la fibra desnuda, la protección exterior de esta debe ser cortada cuidadosamente de forma longitudinal, marcando exteriormente la fibra. El corte longitudinal a la protección exterior permitirá exponer el tipo de amortiguador de la fibra, el cual puede ser removido químicamente o con algunas herramientas desmanteladoras mecánicas (si se utilizan sustancias químicas y no son removidas de manera adecuada, la fibra se dañará), la fibra está lista para el proceso de empalme.

Recuerde que, cuando trabaje con fibras, debe seguir las instrucciones específicas de empalme disponibles por el fabricante de equipo de empalme y por los constructores de cables fibra óptica.

Los bordes de la fibra pueden ser conectados por un EMPALME DE FUSIÓN, fusionando los dos bordes de la fibra (derritiendo el vidrio), o por un EMPALME MECÁNICO, alineando mecánicamente los dos bordes y posicionándolos permanentemente. Los métodos son mostrados esquemáticamente en la figura 4.1.



**FIGURA 4.1 EMPALMES.**  
**(a) Empalme por fusión, (b) Empalme mecánico**

La figura 4.1 a muestra un empalme por fusión, los dos bordes son apareados y calentados hasta que lleguen al punto de derretido. (Este tipo de empalmes no puede usarse en fibras completamente de plástico).

La figura 4.1 b muestra un tipo de empalme mecánico, en el se aseguran los dos bordes en su lugar.

El gel index matching (gel con índice apropiado) que se agrega a la unión, ayuda a eliminar cualquier variación en el índice de refracción fibra-aire-fibra. El gel es transparente y tiene el índice de refracción del núcleo de la fibra. Ambos métodos requieren que de alguna manera se mantengan alineados los dos bordes de la fibra.

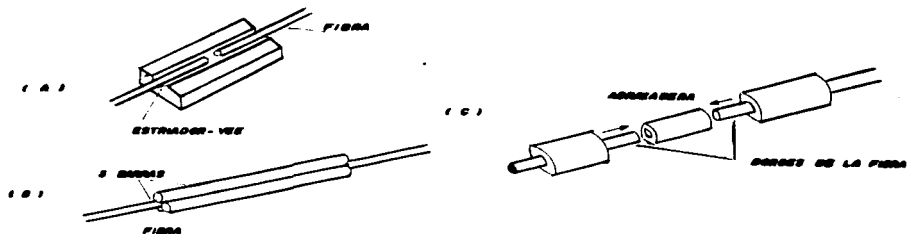
#### 4.2.1 Empalme por fusión.

El proceso de empalme por fusión es realizado mediante un sofisticado instrumento que permite alinear las fibras en todas direcciones. Primero, los bordes son alineados y se aplica una apropiada presión de empalme. Entonces, se aplica calor, usualmente por un arco eléctrico. Una sola vez las fibras son fusionadas, entonces, se hacen una. Sólo se necesita cubrir el área de empalme para protegerla de posibles daños en el manejo de la fibra. A menudo, se utiliza una cubierta de plástico para proteger el empalme. Las pérdidas ocasionadas por el empalme por fusión suelen estar cerca de 0.1 db.

Típicamente, este proceso de empalme es ejecutado en el laboratorio en vez de que se realice en el campo de trabajo común. A menudo, este proceso se utiliza en combinación con un sistema local de inyección y detección. El propósito de este sistema es permitir el mejor alineamiento de los bordes de la fibra, un transmisor óptico y un receptor están conectados a las secciones de las fibras que serán fusionadas. El alineamiento es completado por el ajuste de los dos bordes hasta que la máxima potencia es leída por el receptor. Las fibras son aseguradas en su lugar y el calor de fusión es aplicado.

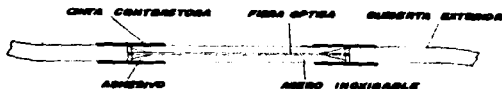
#### 4.2.2 Empalme mecánico

El proceso de empalme mecánico consiste en una alineación de los bordes de la fibra y en asegurarlos en su lugar con la ayuda de varios dispositivos posicionadores y cemento óptico. Algunas configuraciones de enlace mecánico son mostradas en la figura 4.2. El propósito de todas estas configuraciones (el estridor Vee, las tres barras y la abrazadera) es alinear los dos bordes. Además, en las estructuras mostradas, el empalme es asegurado por cemento óptico, entubado o en cinta.



**FIGURA 4.2 EMPALME ALINEAMIENTO MECÁNICO.**  
**(a) Estridor Vee, (b) Alineamiento tres barras, (c) Abrazadera.**

Una estructura detallada y completa de empalme mecánico es mostrada en la figura 4.3. Un tubo de acero, llamado abrazadera, con las dimensiones apropiadas para la fibra y su protección exterior se utiliza para conectar las dos fibras. los embudos (conductos) son dos puntas llenas con adhesivo óptico para retener las fibras en su lugar mientras una cinta encogible (contractora) da cierta fortaleza mecánica para el empalme total.



**FIGURA 4.3 EMPALME MECÁNICO.**  
Abrazadera de acero inoxidable

#### 4.2.3 Procedimiento de empalme

A continuación se muestran un número de pasos involucrados con el procedimiento de empalme.

- 1.- Remueva la protección exterior de la fibra sin dañar la misma, usando ciertas herramientas mecánicas (similares a las utilizadas para pelar alambre de cobre), esto también puede hacerse simplemente usando una navaja afiladora a fin de hacer el corte longitudinal en la capa protectora. Remueva solamente el tramo necesario para realizar el empalme. Asegúrese de leer y seguir las instrucciones específicas del fabricante de empalmes.
- 2.- Remueva el tubo amortiguador. Esta cubierta de plástico de la fibra, puede ser removida cuidadosamente rayando el amortiguador para después retirarlo.
- 3.- Corte los bordes de la fibra a la longitud deseada. Unos bordes bien cortados deberán lucir como si estuvieran pulidos. Debe usar un microscopio para verificar que los bordes no estén dañados. Si lo están, debe cortar uno u otro borde otra vez o, en su defecto, pulirlos. Es importante que la orilla de la fibra sea lisa y perpendicular a lo largo de ella. Para este propósito, existe una gran variedad de herramientas. Una herramienta simple lo es una navaja de carburo (acero) o un cortador de diamante. La fibra es cuidadosamente rayada con la herramienta de corte y luego se inclina hasta

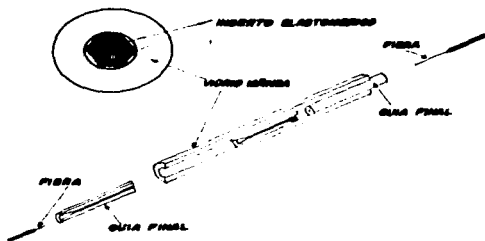
que se rompe donde se rayó. Con este método se obtiene un corte limpio, se necesita practicar.

- 4.- Cuando la fibra está lista, puede ser introducida en una estructura de empalme, afianzadora o en un equipo de empalme por fusión.
- 5.- Para empalmes por fusión, el calor se debe aplicar ahora para derretir los bordes de la fibra mientras son empalmados.
- 6.- El empalme es completado encerrándolo en una estructura apropiada. Para el proceso final o etapas finales, se utilizan varios cementos. Algunos adhesivos pueden ser "curados" (endurecidos) a temperaturas relativamente altas en largos periodos de tiempo; otros pueden ser "curados" a muy altas temperaturas por un periodo corto de tiempo. Aún, otros adhesivos se pueden dejar endurecer aplicando luz ultravioleta UV. Este tipo de adhesivos (los que requieren rayos UV) son preferidos, dado que el calor puede dañar la protección exterior de la fibra.

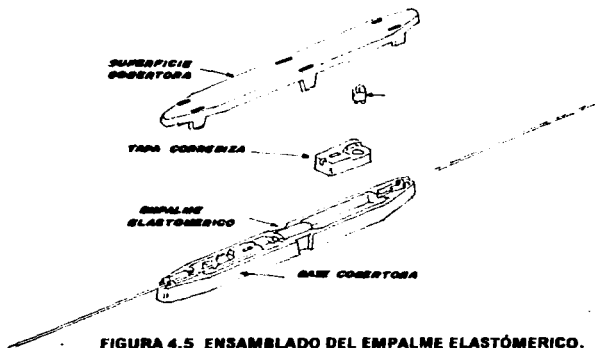
Como se sabe, se tiene un buen empalme cuando las pérdidas ocasionadas por el mismo son pequeñas. Los empalmes por fusión pueden ser hechos con pérdidas en el rango de 0.01 a 0.02 db. Los empalmes mecánicos usualmente producen pérdidas de 0.15 a 0.5 db.

Otra estructura para el proceso de empalme mecánico es el denominado empalme "elastomérico" (elastomeric splice) cuyos detalles son mostrados en las figuras 4.4 y 4.5. La función principal de esta estructura de empalme es la de alinear las puntas de la fibra. El alineamiento es completado por la colocación de las dos fibras en un tubo triangular hasta que topan. Para reducir las pérdidas de mal apareamiento se preinserta un gel en el área donde se juntan las fibras. La superficie exterior (forma hexagonal) del tubo triangular es colocada en una especie de manga donde se proporciona cierta fortaleza mecánica.





**FIGURA 4.4 EMPALME ELASTÓMÉRICO DE FIBRA ÓPTICA**



**FIGURA 4.5 ENSAMBLADO DEL EMPALME ELASTÓMÉRICO.**

El empalme de un cable multifibras involucra, además del empalme de cada fibra, la colocación de cada fibra empalmada en un organizador de empalmes, el cual está diseñado para sostener cada empalme y dar firmeza mecánica a toda la estructura.

Es conveniente tener todas las herramientas de empalme bien organizadas y a la mano. Una opción para ello es el empalmador de fibra óptica "Kit", el cual es un organizador que contiene todas las herramientas necesarias para realizar estos trabajos.

#### 4.3 Conectores

Los problemas encontrados en empalmes son también aplicables a los conectores de fibras. Una adicional e importante dificultad es la de encontrar una forma fácil de conexión-desconexión. Las terminales de la fibra deben venir juntas, tan cerca como sea posible, sin dañar las fibras. El montaje de los conectores en las fibras requiere un especial cuidado y precisión. Las longitudes de las fibras y de su protección exterior deben ser cuidadosamente medidas de acuerdo con las instrucciones del fabricante del conector. Los bordes de la fibra ser pulidos. A menudo, el proceso de pulido es realizado después de que la fibra se monta en el conector.

Los conectores de fibra monomodo requieren un grado mucho más alto de precisión que los conectores multimodo, dado que el más pequeño desalineamiento en el diámetro de la fibra conduce a una pérdida sustancial.

Una gran variedad de conectores monofibra están disponibles, desde un simple conector de plástico hasta la precisión de los conectores de acero. También, existe una gran variedad de conectores multifibra. Cada conector varía de acuerdo con sus características, además, cada conector tiene sus propias instrucciones de armado, así como su proceso de conexión.

Un conector monofibra (single - fiber connector) de plástico es mostrado en la figura 4.6. El conector mostrado es usado comúnmente para fibras con diámetros grandes (núcleo sobre 100  $\mu\text{m}$ ). Se debe tener el conector correcto para las dimensiones específicas de su fibra.

La figura 4.8 muestra un conector metálico, el cual posee una alta precisión. Este conector puede ser utilizado para diámetros pequeños en fibras de comunicaciones. Una variedad de conectores de fibras monomodo y multimodo son mostrados en la figura 4.9.

El conector lineal grande combina un circuito conector impreso con 8 fibras conectores.

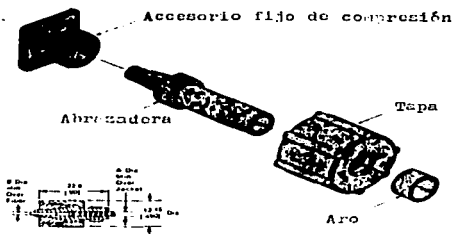


FIGURA 4.6 CONECTOR DE PLÁSTICO PARA FIBRA ÓPTICA

La conexión de fibras monomodo requiere algo más que una sofisticada aproximación. El posicionamiento requiere alinear los dos núcleos con una precisión de digamos  $10 \mu\text{m}$ , cosa que es casi imposible de lograr. La solución radica en el uso de lentes en el "Conector de Rayos Expandidos" (expanded beam connector) (un conector que utiliza lentes para expandir el haz de luz), una esquematización aproximada se muestra en la figura (4.7). El concepto básico es el de aumentar el tamaño efectivo del haz de manera que la desalineación lateral no produzca muchas pérdidas como una conexión fibra-fibra. Un diagrama detallado de un conector que utiliza rayos expandidos es mostrado en la figura (4.10).

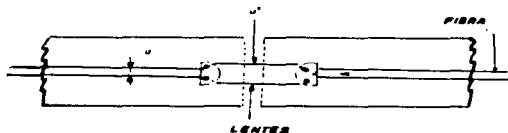
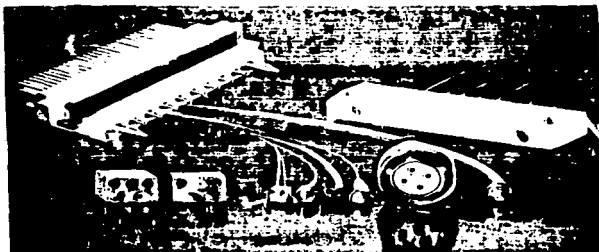


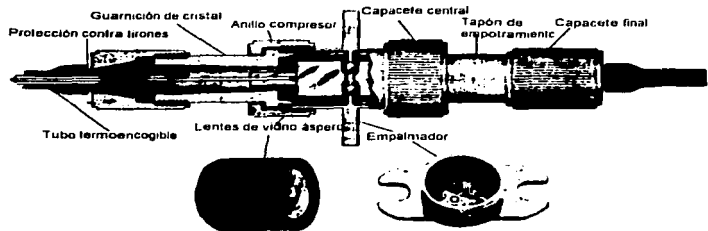
FIGURA 4.7 PRINCIPIO DEL RAYO EXPANDIDO.-  $a$  = diámetro del núcleo  $a$  = diámetro efectivo del rayo.



**FIGURA 4.8 CONECTOR METÁLICO PARA FIBRA ÓPTICA EN LÍNEA.**



**FIGURA 4.9 CONECTORES MONOFIBRA Y MULTIFIBRA.**



**FIGURA 4.10 FOTOGRAFÍA DE UN CONECTOR DE RAYOS EXPANDIDOS PARA FIBRA MONOMODO.**

#### 4.4 Pérdidas en conexiones.

Las causas de pérdidas ópticas en una conexión fibra - a - fibra por empalme o por conector, caen dentro de dos clases: pérdidas por desalineación y pérdidas que resultan de apareamientos mal hechos en las características de la fibra, como desigual área del núcleo, apertura numérica (N.A.) y contorno del núcleo. Además se pueden tener pérdidas de reflexión de Fresnel cuando hay un hueco de aire entre los dos bordes o terminales de las fibras. Note que la discusión que seguimos, se refiere a las fibras multimodo de índice escalón. Las fibras monomodo son mucho más sensibles a desalineaciones y malos apareamientos.

##### 4.4.1 Pérdidas por desalineación.

Este texto cubre tres tipos de pérdidas por desalineamiento, todas se muestran en la figura 4.11. También se muestran gráficas que relacionan la desalineación con las pérdidas para fibras multimodo y monomodo.

Se debe visualizar cada tipo de pérdida por separado, como si las otras no existieran.

- 1.- Pérdidas por desalineación lateral (lateral misalignment).
- 2.- Pérdidas por desalineación de separación final (end separation misalignment).
- 3.- Pérdidas por desalineación angular (angular misalignment).

- Desalineación lateral, falla radial.

Las pérdidas por desalineación lateral son causadas por el desplazamiento paralelo de los ejes de la fibras, el desalineamiento más problemático puede ser estimado matemáticamente en db por:

$$\text{Pérdida}_{\text{lat}} = -10 \log [1 - (1.28 \ l/d)] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde  $l$  representa el desalineamiento y  $d$  es el diámetro del núcleo. El signo menos es introducido, ya que el resultado calculado es positivo. La ecuación 4.1 es válida para cuando  $l/d$  es menor que 0.1. El término  $l/d$  representa el desplazamiento relativo paralelo. Esto no incluye otros efectos de pérdida. En otras palabras, asumimos que no hay otros desalineamientos y no hay reflexiones de Fresnel.

- Desalineación de separación final, falla axial.  
Dos factores causan pérdidas ópticas en la desalineación de separación final. El primero son las reflexiones de Fresnel. Estas son el resultado de la variación en el índice de refracción entre la fibra, el aire (hueco) y otra vez el núcleo de la fibra. La pérdida total involucrada es el doble de la reflexión de Fresnel de cada terminal o borde de la fibra. Para establecer la definición de atenuación como  $P_{\text{sal}}/P_{\text{ent}}$  la pérdida de separación final es

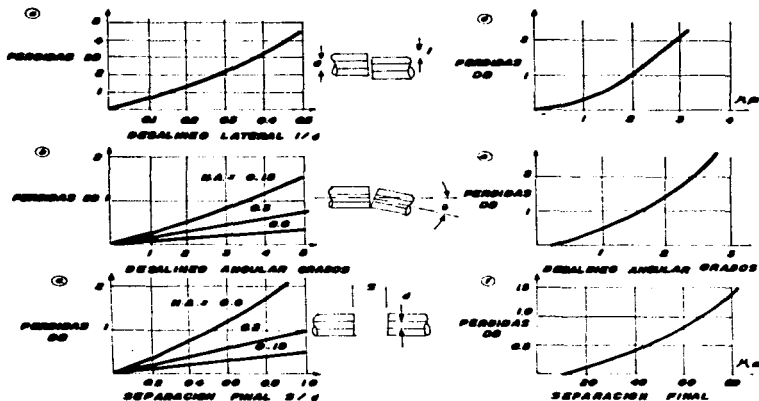
$$\text{Pérdida}_{\text{sep. fr.}} = -10 \log (1 - fr) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde  $fr$  representa las pérdidas de reflexión de Fresnel y pueden ser calculadas por:

$$\text{Pérd.}_r = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

Este tipo de pérdidas, es común que se encuentren alrededor de 0.3 db. Estas pérdidas pueden ser eliminadas llenando el hueco existente entre los bordes de la fibra con un gel óptico que tiene un índice de refracción adecuado. Cuando use gel óptico, tenga cuidado de la tendencia de este a atraer polvo, lo cual puede conducir a tener pérdidas inesperadas.

El segundo factor de pérdida, producido por la separación de la fibra, es mostrado en la figura 4.11. Algunos de los rayos de la fibra transmisora escapan de ella y no inciden en el extremo de la fibra receptora. Para separaciones "s" que son de menos de 10% del diámetro del núcleo, la pérdida es menor a 0.1 db (para N.A. tan grande como 0.4) y no es tan significativo como las otras pérdidas. Note que las pérdidas por una separación final se incrementan con incrementos de N.A. (ver la figura 4.12).



**FIGURA 4.11 PÉRDIDAS POR DESALINEO MECÁNICO (a, b, y c).**

Para fibras multimodo con núcleo de  $100 \mu\text{m}$ , y  
(d, e, y f) para fibras monomodo con núcleo de  $8 \mu\text{m}$

♦ Desalineación angular. Falla angular.

La desalineación angular se presenta cuando los dos bordes de la fibra no están alineados a lo largo del mismo eje. Una pequeña desalineación angular  $\theta$  puede causar pérdidas substanciales, como se muestra en la gráfica de la figura 4.11. Una expresión matemática que da una buena aproximación para la desalineación angular es:

$$\text{Pérdida}_{\text{ang}} = -10 \log [1 - (n \theta) / (180 \text{ N.A.})]$$

Ecuación 4.3

donde  $\theta$  está dado en grados y  $n$  es el índice de refracción en la abertura;  $n$  es usualmente uno u otro, para el aire es 1 o el mismo índice del núcleo cuando se utiliza un gel con índice conveniente (index - matching gel). Otra vez, esta expresión no incluye otras pérdidas.



**FIGURA 4.12 PÉRDIDAS DE SEPARACIÓN FINAL.**

#### 4.4.2 Apareamientos mal hechos característicos de las fibras.

Aquí aprenderemos acerca de tres tipos malos de apareamientos característicos en las fibras.

- 1.- Malos apareamientos de sección transversal (cross - section mis - match).
- 2.- Mal apareamiento N.A. (N.A. mis - match).
- 3.- Mal apareamiento del contorno (profile mis - match)

- Malos apareamientos de sección transversal.

Se puede dar lugar a una pérdida de energía sólo si la sección transversal del núcleo transmisor de la fibra no es tan extensa como la de la fibra receptora. La situación contraria no produce pérdidas. Esta pérdida a causa de un mal apareamiento de áreas (dos extremos de fibra con áreas diferentes) es directamente proporcional a la razón de las áreas de los núcleos:

$$\begin{aligned} \text{Pérdida}_{\text{area}} &= -10 \log (a_2 / a_1) = -10 \log (d_2 / d_1)^2 \\ &= -20 \log (d_2 / d_1) \end{aligned} \qquad \text{Ecuación 4.4}$$

donde  $a_1$  y  $a_2$  son las áreas de las fibras transmisora y receptora, respectivamente; y  $d_1$  y  $d_2$  son sus respectivos diámetros.

Si la variación en el área del núcleo para la misma fibra es muy pequeña, ocasiona pérdidas por área mal apareada también muy pequeñas cuando se empalman dos bordes del mismo tipo de fibra.

- Mal apareamiento de N.A.

Igualmente válida para el área mal apareada, la pérdida causada por las variaciones de apertura numérica N.A., a lo largo de la fibra, es muy pequeña. Esta pérdida es insignificante cuando se conectan los bordes del mismo tipo de fibra. Este tipo de pérdida



existe sólo cuando el N.A. de la fibra transmisora es mayor que el de la fibra receptora. A continuación se da una ecuación para aproximar esta pérdida.

$$\text{Pérdida}_{NA} = -20 \log (N.A._2 / N.A._1)$$

Ecuación 4.5

donde  $N.A._1$  y  $N.A._2$  son, respectivamente, la apertura numérica de las fibras transmisora y receptora, además  $N.A._2 < N.A._1$ .

- Mal apareamiento del contorno.

Este mal apareamiento significa que la forma de los dos extremos de la fibra no es la misma. Por ejemplo, una termina en forma elíptica y la otra en forma circular. Las pérdidas son básicamente pérdidas del mal apareamiento de área y son muy pequeñas en las fibras sumamente estándar.

Recuerde que cuando trabaje con fibras monomodo, los problemas causados por desalineación y mal apareamiento son mucho más severos que cuando trabaja con fibras multimodo y las pérdidas resultantes son más substanciales. El efecto de los tres tipos de pérdidas por desalineación en una fibra monomodo son mostrados en las figuras 4.11d hasta 4.11f.

El promedio de pérdidas introducidas por un conector varía de 0.5 a 1.5 db y, además, varían con el uso frecuente. Cuando un conector es reconectado, su pérdida no es la misma que antes de su reconexión. Además, pueden variar de conexión a conexión. A menudo un cambio de conector puede mejorar el acoplado y reducir la pérdida y viceversa.

El promedio de las pérdidas por empalme, se encuentra dentro del rango de 0.1 a 0.5 db. El mismo procedimiento utilizado el mismo método de empalme puede no producir empalmes con la misma pérdida. La pérdida variará de empalme a empalme. La gran diferencia, entre las pérdidas por empalme y por conector resultan de la naturaleza de la conexión. Con un empalme permanente, una conexión fija, es relativamente fácil colocar las fibras adecuadamente y minimizar todas las pérdidas. Las características del empalme no cambian con el tiempo, particularmente las del empalme por fusión. En cambio las características de las fibras conectadas (tramos de fibras que contienen conectores) se deterioran con repetidas operaciones conexión - desconexión.

#### 4.5 Métodos para la medición de la atenuación.

Para la medición de la atenuación se presentan tres métodos.

- 1.- El de corte.
- 2.- El de inserción de pérdidas.
- 3.- El de retrodispersión.

- El método de corte.

Este método es considerado como el más exacto y, de hecho ya ha sido aceptado como el de referencia general. Si bien en ciertas aplicaciones, su carácter destructivo puede representar una desventaja (en el campo de trabajo común, por ejemplo).

Para este método, se determina la potencia luminica en los puntos  $P_1$  y  $P_2$  del conductor de fibra óptica estando la longitud  $L_2$  habitualmente ubicada en un extremo de dicho conductor y la longitud  $L_1$  cerca del corte

Cuando se realiza la medición, se mide primero la potencia luminica en el extremo  $P_2$  y luego la potencia luminica  $P_1$ . Para la medición de  $P_1$  se debe realizar un corte en el conductor sin afectar las condiciones de acoplamiento entre el emisor y el receptor. El coeficiente de atenuación  $f$  (en db/Km) para el conductor de fibra óptica se calcula con la siguiente expresión.

$$f = (10/L_2 - L_1) \log (P_1 / P_2) \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Este método es de tipo destructivo, ya que es necesario seccionar un tramo corto de conductor de fibra óptica

- Metodo de inserción de pérdidas

Este método evita el caracter destructivo del método anterior, claro está a costa de una menor exactitud en la medición hecha, debido a la inserción de la fibra óptica de referencia

En este método determinaremos la potencia luminica en el extremo del conductor de fibra óptica bajo medida, para luego comparar esta con la potencia luminica en el extremo de un tramo corto del conductor de fibra óptica. Este tramo corto se utiliza como referencia y debe tener las mismas características y conformación que el conductor de fibra óptica bajo prueba

Cuando se efectúe la medición se debe verificar que las condiciones de acoplamiento al tramo de referencia sean, en lo posible, a las del conductor bajo medición. A causa de estas restricciones, son menos exactas y reproducibles las mediciones efectuadas con el método de inserción que las que se obtienen con el método de corte.

La atenuación de la fibra bajo prueba se obtiene por.

$$f \text{ (db/Km)} = (1/L) 10 \log (P_1 / P_2) - f_c \quad \text{Ecuación 4.7}$$

donde  $P_1$  es la potencia luminica de la fuente,  $P_2$  es la potencia luminica medida en el extremo lejano,  $L$  es la longitud del cable y  $f_c$  es la atenuación de conectores.

El método de inserción es particularmente útil para medidas en cable ya instalado. Las limitaciones que presenta son las mismas que el método de corte con aparatos de campo, con el agravante de la incertidumbre sobre las pérdidas exactas que introduce el conector o la técnica de acoplamiento que se utilice.

- Método de retrodispersión.

Probablemente sea uno de los métodos más útiles para caracterizar la fibra durante las etapas de instalación del cable óptico. Es, en definitiva, un método reflectométrico en el dominio del tiempo, que si bien viene usándose frecuentemente para localizar defectos del cable, también proporciona información sobre la atenuación de la fibra.

Este método de medición se basa en la dispersión de Rayleigh. Mientras que la fracción principal de la potencia luminica se propaga hacia el extremo del conductor, una pequeña proporción se dispersa retornando hacia el emisor. Esta potencia luminica retrodispersada experimenta a su vez una atenuación en el trayecto de retorno. La luz remanente que llega al principio del conductor, allí se desacopla y se mide por medio de un dispositivo divisor de rayos. Con esa potencia luminica retrodispersada y el tiempo de recorrido en el conductor de fibra óptica es posible trazar un diagrama del cual se desprende la variación de atenuación a lo largo de todo el conductor. En la pantalla de un osciloscopio se podrá observar fácilmente el recorrido de la señal retrodispersada en función del tiempo. Si el coeficiente de atenuación y el factor de retrodispersión son constantes a lo largo del conductor de fibra óptica se obtendrá una curva exponencial decreciente desde el comienzo del mismo.

## CAPÍTULO V

### CONVERSIÓN, DISTRIBUCIÓN, INTERRUPCIÓN DE SEÑALES ÓPTICAS.

#### 5.1 Introducción

Los temas cubiertos en este capítulo se relacionan con la conversión, distribución e interrupción de señales ópticas. En líneas de transmisión con conductores de fibra óptica e interconexiones punto a punto, se hacen necesarios varios elementos. En principio, los extremos de los conductores requieren de emisores y receptores ópticos. Cuando las líneas de fibra óptica deben ser seccionadas, se dispone de interruptores ópticos adecuados.

Para transmitir informaciones a través de un conductor de fibra óptica en dos o más direcciones o reunir varios emisores o receptores en una estructura óptica, se requiere de acopladores. Los acopladores son dispositivos de varias puertos y sirven para dividir o cambiar las señales ópticas dependiendo de la configuración del dispositivo.

La última parte de este capítulo presenta varios esquemas de modulación y técnicas de multiplexado. El objetivo es familiarizarse con estos métodos y técnicas en términos de como se cumplen.

#### 5.2 Conversión electro - óptica de señales

Para la transmisión de señales luminicas a través de un conductor de fibras ópticas se requieren, en su comienzo y su final, elementos de emisión y recepción adecuados para convertir las señales eléctricas en ópticas y viceversa (figura 5.1).

En el extremo emisor, una señal eléctrica modula la intensidad de una fuente luminosa. La señal luminosa se acopla al conductor de fibra óptica y llega al extremo receptor de modulador, donde la luz se convierte en una señal eléctrica.

En la técnica de los semiconductores, en base a elementos químicos del tercero, cuarto y quinto grupo de la tabla periódica y sus combinaciones, los conversores electro- ópticos han demostrado ser particularmente aptos.

Los semiconductores poseen dos bandas de energía para los electrones: la banda de valencia y la banda de conducción.

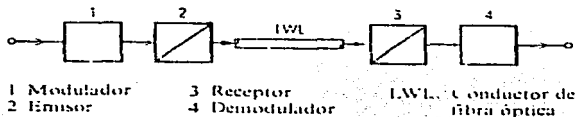
Un fotón que incide sobre el semiconductor cede su energía a un electrón en la banda de valencia, esto incrementa su energía y pasa a la banda de conducción, de mayor energía, dejando en la banda de valencia un espacio vacío denominado hueco, el fotón desaparece. Se trata de una absorción, una de las interacciones electro-ópticas.

Los electrones pueden volver espontáneamente a los huecos de la banda de valencia, si la banda de conducción está ocupada en exceso de su equilibrio, en cuyo caso el semiconductor puede emitir un fotón por cada electrón. Este proceso se denomina recombinación irradiante de portadores de carga en exceso pues en él se unen electrones y huecos en exceso. Se dice que se tiene emisión espontánea o luminiscencia

En cambio, se trata de emisión estimulada cuando fotones existentes en el semiconductor excitan a los portadores de carga para obtener una recombinación irradiaante es decir para emitir fotones.

Estos tres procesos siempre se desarrollan simultáneamente, predominando uno de ellos, el cual puede ser aprovechado técnicamente. Así en el fotodiodo se utiliza la absorción, en el diodo emisor de luz (o luminiscente) la emisión espontánea y en el diodo láser la emisión estimulada.

Cabe mencionar, además, que un semiconductor en el cual la conducción está en su mayor parte a cargo de electrones (portadores de carga negativos), se denomina semiconductor "n". En cambio, se denomina semiconductor "p" a uno con déficit de electrones, en el cual los huecos (portadores de carga positivos) realizan principalmente la conducción. La unión de una capa de semiconductor "p" y otra "n" o sea una juntura "pn" conforma un diodo.



Principio funcional de un sistema de transmisión con conductor de fibra óptica

FIGURA 5.1

### 5.2.1 Sistemas analógicos y digitales.

Las cantidades físicas pueden ser representadas en formas analógicas o digitales. La representación analógica es continua y puede tener cualquier valor numérico entre cero y algún valor máximo.

En contraste, la señal usada en representación digital consiste de dos niveles, alto y bajo o uno y cero, respectivamente. Comúnmente se usa el código binario, un código de dos niveles, por ejemplo el símbolo "e" puede ser representado mediante el código ASCII como 1100101 y el número 10 por valores binarios 1010. Estos códigos frecuentemente se representan como un tren de pulsos.

Las cantidades analógicas pueden ser representadas en forma digital. Por ejemplo un voltaje de 5V puede ser representado mediante el valor digital 110010 (50 en decimales). La conversión de cantidades analógicas puede ser hecha electrónicamente por conversores analógicos a digitales "ADC". Similarmenre valores numéricos digitales pueden ser convertidos a señales analógicas mediante el uso de conversores digital a analógico "DAC".

En la conversión de señales analógica a digital, un muestreo es usado. Usted realmente está obteniendo muestras de aquella señal; por supuesto se deben tener suficientes muestras para representar la señal continua. Típicamente 8 pulsos son usados para representar cada muestra y alrededor de 4 muestras son requeridas para cada ciclo analógico (El número mínimo de muestras requerido es 2, el cual puede ser usado sólo en transmisiones perfectas, si ruido Este número está basado en el teorema del muestreo de Nyquist)

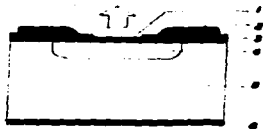
### 5.2.2 Emisores ópticos

El emisor óptico convierte las variaciones de las señales eléctricas en variaciones de potencia luminica. Las variaciones en la intensidad luminosa, se obtiene por modulación analógica y las variaciones en la longitud, secuencia y posición del pulso, por modulación digital

Los diodos láser "LD" y los diodos emisores de luz "LED" se usan como convertidores electro- ópticos

- Diodo emisor de luz "LED"

Este dispositivo consta de juntas heterogéneas en estado sólido fabricadas a partir de GaAs, GaAsP, GaAlAs. Los electrones inyectados a través de la junta pn se combinan con los huecos para producir fotones de luz. Cuando se aumenta la corriente inyectada, se produce un aumento de luz emitida. Básicamente se puede decir que un LED, ya sea que emita desde su superficie o desde sus bordes tiene un amplio cono de radiación.



- 1 CAPA ANTIRREFLEXION
- 2 CONTACTO P
- 3 DILUCION DE GaAs
- 4 GaAs (SPACER)
- 5 GaAs (SUBSTRATO)
- 6 CONTACTO N

**FIGURA 5.2 CORTE ESQUEMÁTICO DE UN DIODO EMISOR DE LUZ (LED) DE GaAs.**

#### • Diodo láser

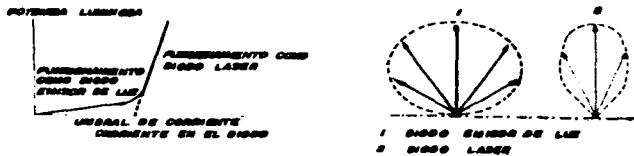
En el diodo láser se provoca, por medio de una corriente de alta densidad, un gran exceso de portadores de carga en la juntura pn que posibilita una fuerte emisión de luz. Este efecto amplificador producido por una avalancha de fotones es apoyado por un resonador óptico que, en general, está formado por dos espejos planos paralelos semitransparentes. En el diodo láser, ambas superficies espejadas son superficies naturales de cristal que se forman al dividirse el cristal semiconductor y se recubren con una caja protectora adicional.



- 1 ABERTURA PARA CONTACTO
- 2 METALIZADO (P, P+Au)
- 3 MANEJO DE ONDA (AlO<sub>3</sub>)
- 4 CUBIERTA (GaAs)
- 5 RECUBRIMIENTO (GaAlAs)
- 6 CAPA ACTIVA (GaAs)
- 7 RECUBRIMIENTO (GaAlAs)
- 8 SUBSTRATO (GaAs)

**FIGURA 5.3 CORTE ESQUEMÁTICO DE UN DIODO LÁSER (LD) DE GaAs**

Para demostrar la diferencia entre el diodo emisor de luz LED y un diodo láser LD se ilustra en la figura 5.4 las relaciones típicas de potencia luminosa/corriente eléctrica. A medida que aumenta la corriente en el diodo se llega a un umbral donde la amplificación luminosa en el cristal compensa las pérdidas provocadas por la atenuación y radiación. Pasando este umbral se produce una fuerte emisión láser. Al trabajar el diodo láser, se produce una emisión en una o en pocas líneas espectrales, en contraposición a la amplia distribución espectral del diodo emisor de luz.



**FIGURA 5.4 (a) CURVA CARACTERÍSTICA POTENCIA POTENCIA LUMINOSA/CORRIENTE. (b) DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN.**

5 2 4 Receptores ópticos

En lugar de referirse al receptor como un detector de luz, generalmente se habla de un fotodetector, fotodiodo o de un convertidor O/E.

En principio, las junturas pn de semiconductores se pueden utilizar no sólo para excitación de portadores por inyección luminica, sino también para la concentración de portadores de carga excitados ópticamente

En el fotodiodo se aprovecha el efecto de la absorción de radiación luminosa por un semiconductor. En este proceso se libera un par electrón - hueco por la incidencia de un fotón

- Fotodiodo PIN

En semiconductores con bajo coeficiente de absorción se incrementa la zona de absorción para la radiación intercalando entre el semiconductor n y el p, una capa de empobrecimiento o zona intrínseca. A este diodo se le llama fotodiodo PIN.

La figura 5 5 ilustra un corte esquemático de un diodo con una estructura PIN donde "i" representa la zona intrínseca, la cual es conductora de portadores n. La luz incide sobre el diodo a través de la zona p; esta superficie se recubre con una capa  $Si_3N_4$  para evitar pérdidas por reflexión.

Para aumentar la sensibilidad de los fotodiodos PIN se puede agregar un transistor de efecto de campo (FET). Con estos módulos híbridos PIN - FET se obtienen sensibilidades muy elevadas





**FIGURA 5.6 CORTE ESQUEMÁTICO DE UN FOTODIODO PIN.**

• Fotodiodo de avalancha "APD" o "FDA".

La luz incidente genera pares electrón - hueco, por lo tanto se obtiene un transporte de carga. Si el campo eléctrico aplicado es suficientemente intenso, los electrones libres acelerados generan nuevos pares electrón - hueco y se obtiene un efecto multiplicador.

Para cada fotón incidente muchos pares electrón - huecos se pueden generar. Sin embargo, por razones técnicas no puede elegirse muy alto el factor de multiplicación, un valor típico para la multiplicación es de aproximadamente 1 a 5 veces y para la tensión es de 100 - 300 V.

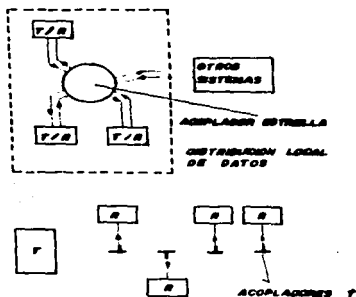
Este proceso se denomina ruptura por avalancha y, en consecuencia, se dice del fotodiodo que es de avalancha (APD o FDA). En la figura se ilustra un fotodiodo de avalancha de silicio.



**FIGURA 5.6 CORTE ESQUEMÁTICO DE UN FOTODIODO DE AVALANCHA DE SILICIO.**

### 5.3 Acopladores de fibra óptica.

Es relativamente simple distribuir la voz en un sistema intercomunicador a tantas estaciones como se desee. La mayor parte del tiempo, es necesario conectar solo unos pocos alambres. La distribución de señales ópticas a muchas estaciones es algo más complejo. No se puede conectar simplemente unas pocas fibras. Los dispositivos que son utilizados en la distribución (una a muchos o muchos a una) de señales ópticas son ACOPLADORES de fibra óptica (figura 5.7). Estos dispositivos especiales cuentan con una o muchas fibras de entrada y una o muchas fibras de salida.



**FIGURA 5.7 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON ACOPLADORES:**  
(a) acoplador estrella, (b) acopladores T en un sistema simple.

#### 5.3.1 Acopladores estrella star couplers

Existen dos estructuras básicas de acopladores estrella, que son mostradas en la figura 5.8. En el tipo transmisivo (transmissive type), figura 5.7a, las señales ópticas que son enviadas a un bloque mezclador desde cualquier fibra de entrada (una sola), están disponibles para todas las fibras de salida. Comúnmente, el número de fibras de entrada es el mismo que el número de fibras de salida. La potencia es eventualmente distribuida. Para un acoplador de  $n \times n$  ( $n$  fibras de entrada y  $n$  fibras de salida), la potencia disponible en cada fibra de salida es  $1/n$  de la potencia óptica de la fibra de entrada (una sola). En tanto,

$$P_{sal} = P_{ent} / n$$

Ecuación 5.1

$P_{sal}$  representa la potencia óptica en una fibra de salida (una sola). La división de potencia (razón de división de potencia), en db, asociada con un acoplador de estrella está dada por:

$$PD = -10 \times \log (1/n)$$

Ecuación 5.2

donde PD es la división de potencia, n es el número de fibras a la salida. El signo menos (-) se agrega para que el resultado sea positivo.

La pérdida excesiva de potencia está definida como la potencia total perdida desde la entrada hasta el total de salidas, no está relacionada con la división de potencia.

$$\text{Pérdidas}_{exc} \text{ db} = -10 \times \log (P_{tot} / P_{ent})$$

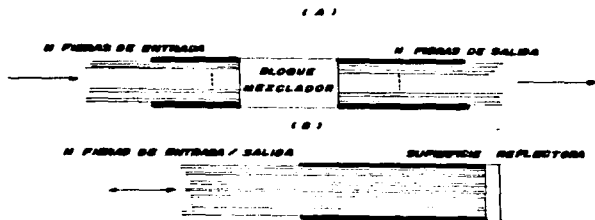
Ecuación 5.3

donde  $P_{tot}$  es la potencia total en todas las fibras de salida. La segunda ecuación representa la pérdida expresada en decibeles.

Para hallar  $P_{sal}$ , la potencia óptica de salida en cada fibra, restamos PD (división de potencia) y las pérdidas excesivas, de la potencia óptica de entrada.

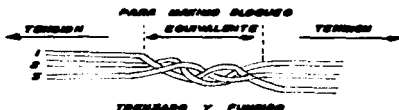
$$P_{salida} = P_{entrada} - PD - \text{Pérdidas excesivas}$$

Ecuación 5.4



**FIGURA 5.8 ACOPLADORES ESTRELLA.**  
(a) transmisor, (b) reflectivo.

El acoplador transmisivo de estrella, transmissive star coupler, puede ser manufacturado fundiendo un número de fibras bajo tensión. El proceso es mostrado en la figura 5.9. El acoplador reflectivo de estrella o reflective star coupler, mostrado en la figura 5.8b, tiene la misma división de potencia que el acoplador tipo transmisivo. Aquí, todas las fibras están de un solo lado. Así que la potencia óptica de cualquier fibra es distribuida en todas las fibras.



**FIGURA 5.9 FUSIÓN DEL ACOPLADOR TRANSMISIVO EN ESTRELLA.**

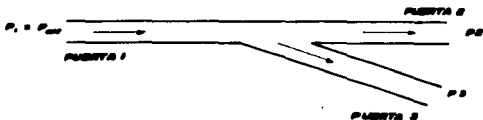
### 5.3.2 Acopladores T.

Una representación esquemática de un acoplador T se da en la figura 5.9. Como se muestra potencia óptica es lanzada dentro de la puerta uno, la cual se divide en las puertas 2 y 3. La potencia dividida no tiene por que ser igual. La puerta 2 puede recibir más o menos potencia que la puerta 3, dependiendo de la estructura del acoplador. La división de potencia (razón de división o razón de división de potencia) está dada en decibeles o en porcentaje. Por ejemplo, una división de 80/20, indica 80% a la puerta 2 y 20% a la puerta 3. En términos de razones de potencia:

$$P_2 / P_1 = 0.8$$

$$P_3 / P_1 = 0.2$$

Otro término importante relacionado con los acopladores T es la directividad (directivity). La transmisión entre puertas en un acoplador T usualmente tiene directividad. Si  $P_3 / P_1$  es 0.2, no se puede asumir que  $P_2 / P_3$  es también 0.2. En otras palabras, la puerta 3 puede recibir 20% de la potencia que entra en la puerta 1, pero no el 20% que entra a la puerta 2. En acopladores T altamente directivos, como el de la figura 5.10, la razón  $P_3 / P_2$  es muy pequeña. Solamente una pequeña parte de la potencia que entra a la puerta 2 ( si la puerta 2 es de entrada) llega a la puerta 3. Comúnmente no se espera que potencia óptica sea transferida entre cualquiera de las dos puertas en el mismo lado del acoplador T.

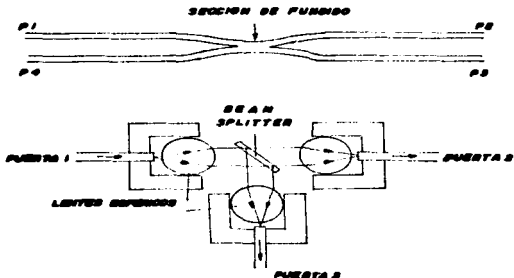


**FIGURA 5.10 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN ACOPLADOR T.**

Las pérdidas excesivas tienen el mismo significado aquí, como lo tienen para los acopladores estrella. Es una relación entre la potencia de salida total (todas las puertas de salida) y la potencia de entrada.

Dos tipos de acopladores T son mostrados en la figura 5.11: los acopladores fusionados o fused couplers y los acopladores de haz expandido o expanded beam coupler.

Los acopladores de tipo fusionado, son construidos de manera similar a los acopladores transmisivos en estrella. El acoplador de haz expandido es, básicamente, un conector de haz expandido con un espejo reflector parcial colocado entre los lentes de las fibras. La parcialidad reflectiva del espejo permite, a parte de la luz, que viaje de la puerta 1 a la puerta 2 y se refleje parte de ella a la puerta 3. La división de potencia óptica es función de la reflectividad del espejo.



**FIGURA 5.11 ACOPLADOR T.**  
(a) fusión, (b) rayo expandido.

Otro tipo de acoplador T, utiliza un lente GRIN (Grin lens) y una superficie parcialmente reflectora que completa el acoplado. Un lente Grin (es un lente con índice gradual) está construido del mismo modo que una fibra con índice gradual. Su longitud es cuidadosamente seleccionada para completar una función particular de enfoque (objetivo, blanco). Aquí se utiliza un lente de un cuarto de ajuste (o un cuarto de periodo). La colocación del acoplador es mostrada en la figura 5.12, el haz desde la puerta 1 es dividido como se muestra y parcialmente reflejado a la puerta 3, mientras la mayoría de la luz es refractada a la puerta 2. La división de potencia es una función de la reflectividad del espejo. Este acoplador es utilizado a menudo como un monitor de potencia óptica en una línea de fibra óptica.

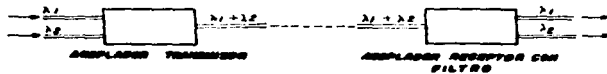


**FIGURA 5.12 ACOPLADOR DE RAYOS EXPANDIDOS CON LENTES GRIN - ÍNDICE GRADUAL.**

### 5.2.3 Otros acopladores.

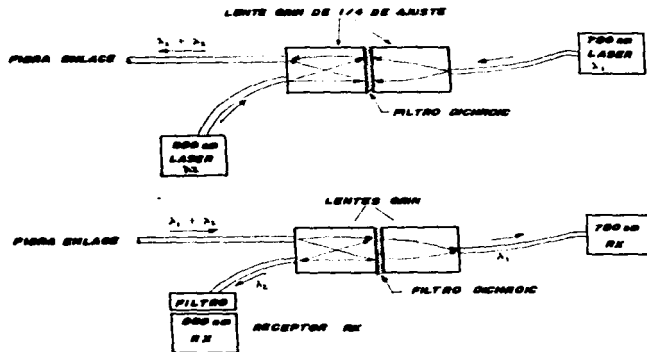
Los acopladores estudiados hasta ahora, han sido diseñados para ser insensibles, tanto como sea posible, a la longitud de la onda. Las características de los acopladores fueron relativamente independientes a la longitud de onda, dentro de la región de operación. Los acopladores utilizados en el multiplexado por división de longitud de onda (wavelength division multiplexing) son diseñados específicamente para acoplarse entre puercas en función de la longitud de onda.

El propósito de estos acopladores es el de separar (o combinar) señales transmitidas en diferentes longitudes de onda. Una descripción funcional de acopladores usados en multiplexado por división de longitud de onda se da en la figura 5.13; las señales  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  (de dos fuentes separadas de datos) son combinadas en el acoplador transmisor y convertidas nuevamente a dos líneas separadas  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  por el acoplador receptor. La combinación de señales  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , es transportada por la fibra principal de transmisión. Esencialmente, el acoplador transmisor es un mezclado de señales, mientras que el acoplador receptor actúa como un filtro de longitud de onda.

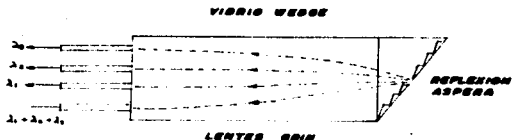


**FIGURA 5.13 DIAGRAMA DE MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA.**

La figura 5.14 muestra como unos lentes especiales Grin se utilizan en el diseño de un acoplador WDM (multiplexado por división de longitud de onda). En la figura 5.14a, un filtro especial de longitud de onda un filtro dichroico, es usado para atravesar los 780 nm de longitud de onda hacia la fibra enlace y para reflejar la señal de 880 nm dentro de la misma fibra enlace. Este es un sistema de multiplexado que combina  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  dentro de la fibra de enlace (link fiber). El dibujo de la figura 5.14b funciona como demultiplexador. La mezcla de señales introducidas desde la fibra enlace, los 880 nm de longitud de onda son reflejados hacia el receptor, entre tanto la señal de 780 nm es atravesada enteramente hacia el otro receptor. Un acoplador de-demultiplexador WDM utiliza lentes es mostrado en la figura 5.15.



**FIGURA 5.14 MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA UTILIZANDO ACOPLADORES. (780 - 880 nm)**  
**(a) Multiplexado (b) Demultiplexado.**



**FIGURA 5.15 MULTIPLEXADO POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA UTILIZANDO REFLEXIÓN ÁSPERA (REFLECTIVE GRATING).**

#### 5.4 Interruptores de fibra óptica.

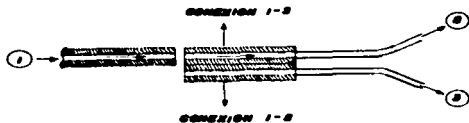
Hasta el descubrimiento de los interruptores ópticos, las funciones de interrupción y control del flujo de datos en una red de comunicaciones era llevado fuera de un nivel electrónico, las señales eléctricas fueron switch-adas antes que las ópticas. Desde que estuvieron disponibles los interruptores ópticos, el control del flujo de datos en las comunicaciones ópticas ha sido completado por los interruptores de señales ópticas entre fibras.

Existen numerosas ventajas de la interrupción o switch-eo óptico al eléctrico. La primera ventaja es la del costo. Es más sencillo y menos costoso interrumpir o switch-ear señales ópticas en un sistema de fibra óptica que convertir las señales ópticas en eléctricas para realizar la interrupción o switch-eo y después, convertir las señales eléctricas en señales ópticas. La segunda radica en un ancho de banda mucho más alto que puede manejar un índice mucho más grande de datos. La tercera es que da al sistema de fibra óptica la flexibilidad que sólo los sistemas electrónicos tienen. Se puede implementar fácilmente una prueba de línea o line testing; los nodos (estaciones transmisoras y receptoras) pueden ser desviados cuando fallan y así, de esta manera se puede evitar que existan perturbaciones en el sistema de comunicaciones conectado al nodo; y la ruta de la señal en la red puede ser fácilmente completada.

##### 5.4.1 Interruptores mecánicos.

La interrupción o switch-eo mecánico de fibra óptica se efectúa por fibras móviles o prismas, que conectan o desconectan el circuito óptico. Una versión simplificada de un interruptor mecánico de fibras ópticas es mostrado en la figura 5.16. Por medio de un deslizamiento en la estructura que retiene las fibras 2 y 3, la puerta 1 puede ser conectada a la puerta 2 o a la puerta 3. Recuerde que las fibras son muy pequeñas por lo que no es fácil alinearlas para obtener un interruptor útil.

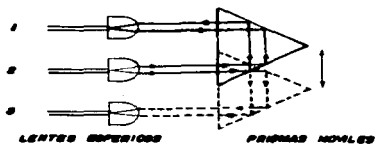




**FIGURA 5.16 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UN SWITCH DE FIBRA ÓPTICA.**

Una técnica de interrupción o switch-ee (similar a la del conector de rayos expandidos) es mostrada en la figura 5.17. Se basa en el movimiento de los prismas lo que permite conectar una puerta con otra. Aquí, como los haces de luz son expandidos, la colocación exacta es menos rigurosa.

Las fibras o los prismas en las figuras 5.17 pueden moverse magnéticamente.

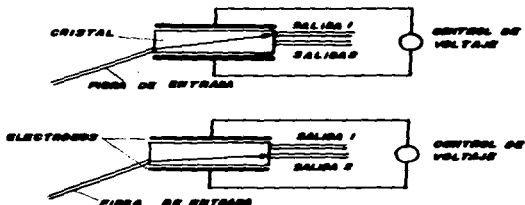


**FIGURA 5.17 SWITCH PRISMA.**

#### 5.4.2 Interruptores ópticos directos.

El electromagnetismo que activa los interruptores es relativamente lento. Toma muchos milisegundos el realizar la interrupción. En contraste, los interruptores ópticos directos pueden realizar una interrupción o switch-ee en un orden de nanosegundos. Las pérdidas introducidas (la potencia perdida por la introducción de un interruptor en el circuito óptico) son relativamente altas, de 3 a 10 db, en comparación con los interruptores mecánicos que se encuentran cerca de 1 db. El costo de un interruptor óptico directo es substancialmente más alto que el de un interruptor mecánico.

El principio fundamental de un interruptor óptico directo es mostrado en la figura 5.18, el índice de refracción del cristal es alterado por la aplicación de voltaje. Esto resulta en un ángulo diferente de refracción en el cristal. En la figura 5.18a no es aplicado voltaje. La entrada es conectada a la salida 1. Con voltaje aplicado, la entrada cambia, es conectada a la salida 2. Como en este tipo de interruptores no hay partes móviles, el tiempo de switch-eo es muy corto, unos pocos nanosegundos.



**FIGURA 5.18 SWITCH ÓPTICO DIRECTO.**  
 (a) sin aplicar voltaje (índice de refracción  $n$ ). (b) con voltaje aplicado.

### 5.5 Modulación y M multiplexado.

Modulación y multiplexado son técnicas usadas en comunicación electrónica y han sido aplicadas en varios grados a la comunicación por fibra óptica. la discusión de modulación concierne métodos de transmisión de información mediante un portador. En este caso el portador es luz. El multiplexado involucra transmisión de información de muchas fuentes independientes a través de un canal único. El cana usado aquí es la fibra óptica.

Existen muchos esquemas de modulación. En frecuencia modulada (F.M.), por ejemplo, la información a ser transmitida modifica la frecuencia del portador. El portador modulado entonces lleva la información, analógica o digital, como variaciones de frecuencia, que representan la amplitud de la señal de entrada. Por ejemplo señales de entrada binaria altas y bajas, serán representadas por dos frecuencias portadoras. En otras palabras, una variación en la frecuencia portadora representa el cambio de alto a bajo (o de bajo a alto). En otro esquema, en amplitud modulada (A.M.) los cambios en la amplitud portadora representan los cambios de amplitud de la señal de entrada. Una amplitud de entrada alta produce una amplitud portadora aumentada y viceversa. En la discusión de la modulación de luz, usted está limitado a la modulación de la intensidad, donde la intensidad de la luz representa la amplitud de la señal de entrada. Esto simplemente significa que si la

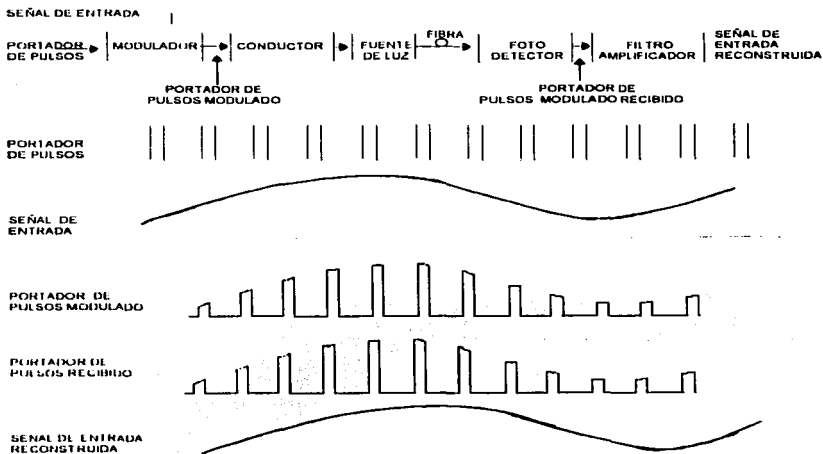
amplitud de la señal de entrada es grande, es más grande la intensidad de la luz transmitida.

#### 5.5.1 Modulación.

La discusión aquí se enfoca en otro nivel de modulación. Está interesada con la relación entre una cantidad de entrada analógica y el tren de pulsos que es usado para representarla. El tren de pulsos es entonces usado para modular la intensidad de luz del portador. Aquí, usted tiene dos niveles de modulación. Primero una señal de entrada modula un tren de pulsos. El tren de pulsos modulado, entonces modula la luz. La modulación del tren de pulsos puede ser Modulación de Amplitud de Pulsos (PAM), Modulación de Pulsos Codificados (PCM), u otras técnicas, como Modulación de Pulsos en Anchura (PDM) y Modulación de la Posición del Pulso (PPM). Recuerde que si la entrada es una cantidad analógica tal como un voltaje, que puede variar con el tiempo (por ejemplo un voltaje sinusoidal), esta no modula directamente al portador de la luz.

- Modulación de pulsos en amplitud "PAM".

En la modulación de pulsos en amplitud, la amplitud de la señal modulada, la entrada, es hecha para controlar la amplitud de un portador de pulsos. El portador aquí no se refiere a la luz que finalmente lleva la información, sino al tren de pulsos que es modulado para representar la señal de entrada. La figura 5 19 da las formas de ondas de tal sistema. Usted puede ver esto como un sistema de muestreo. Al momento del pulso (cada vez que el pulso del portador esté alto) la amplitud de la señal es observada (muestreada) y adelantada al circuito conductor de la fuente de luz. Filtrado apropiado reconstruye la señal del extremo receptor. La proporción de repetición de pulsos del portador debe ser por lo menos lo doble de la frecuencia de la señal. Para mejorar la inmunidad al ruido la proporción del muestreo es a menudo tres o cuatro veces más alto que la frecuencia señal. Para la voz humana (voz en teléfono), la cual tiene una anchura de banda de aproximadamente 4000 Hz, usted puede usar un portador de pulsos de cerca de 16 KHz, cuatro veces más alto que la más alta frecuencia de la señal de entrada. Para una señal de entrada perfecta (sin ruido), usted necesita sólo usar un tren de pulsos con un doble de frecuencia que la frecuencia señal. Esto significa que sólo se necesitan dos muestras por cada ciclo de señal de entrada. La modulación de pulsos en amplitud es sensitiva a interferencias de ruido y consecuentemente no es utilizada muy seguido.



**FIGURA 5.19 MODULACIÓN DE PULSOS EN AMPLITUD.**  
 (a) diagrama de bloques del sistema, (b) forma de onda.

### 5.5.3 Modulación de Pulsos Codificados "PCM".

La modulación de pulsos codificados es la técnica frecuentemente usada en transmisión telefónica en larga distancia. Un diagrama de bloques y señales en forma de onda de esta modulación se muestran en la figura 5.20. Igual como en la modulación de amplitud de pulsos, la entrada es muestreada. Esta vez la magnitud de cada muestra es convertida a un código binario. En la figura 5.20, el código binario es simplemente el valor numérico binario de la magnitud de la muestra. Este código es transmitido vía la fibra. En el extremo receptor, la luz detectada es convertida de regreso al código binario y luego en muestras analógicas mediante un convertidor digital a analógico. El filtro mostrado es necesario para reproducir más de cerca la señal original de entrada.

En este método, solamente las señales de luz "on-off" (encendido-apagado) son enviadas. Es fácil distinguir entre un 0 y un 1, así que el ruido es menos que un problema. Nótese de que en la técnica PAM, la amplitud de cada muestra debe ser sostenida adecuadamente, mientras que aquí, usted solo necesita distinguir entre sostenida adecuadamente, mientras que aquí, usted solo necesita distinguir entre niveles altos y bajos.

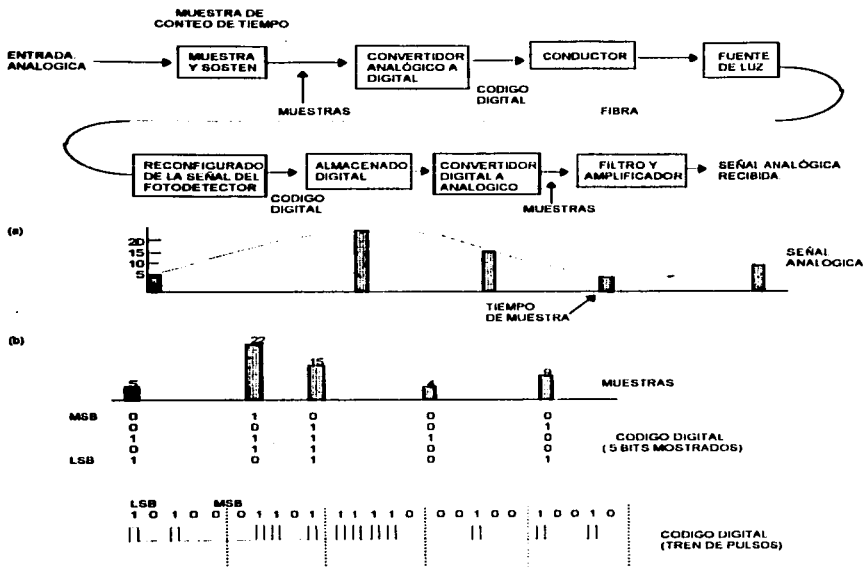


FIGURA 5. 20 MODULACIÓN DE PULSOS CODIFICADOS (a) diagrama de bloques b) formas de onda.

La figura 5.20, representa cinco muestras, con cada muestra convertida a un código de 5 bit. Si, por ejemplo, usted utiliza cuatro muestras por cada ciclo de entrada, con cada muestra convertida dentro de un código de 8 bit, usted termina con  $4 \times 8 = 32$  bits por cada ciclo de entrada. Para una señal analógica de 4 KHz, usted necesita  $4000 \times 32 = 128$  Kb/s. El mínimo porcentaje de información, basado en dos muestras de ciclo por entrada, para la señal de 4000 Hz es entonces 64 Kb/s. Esta proporción es el estándar usado en los Estados Unidos para la transmisión de voz en PCM. La expresión general del porcentaje de bit para PCM es:

$$\text{Porcentaje de bit} = BW \times (\text{muestras/ciclo}) \times (\text{bits/muestra}) \quad \text{Ecuación 5.5}$$

donde BW es el estándar de frecuencia para la transmisión de la voz vía PCM.

- Otros esquemas de modulación.

Los siguientes esquemas de modulación no son usados comúnmente y son discutidos aquí sólo brevemente

- Modulación de Posición de Pulsos "PPM".

La posición del pulso con respecto al pulso tiempo de referencia (figura 5.21b) representa la magnitud de la muestra analógica de la figura (5.21a).

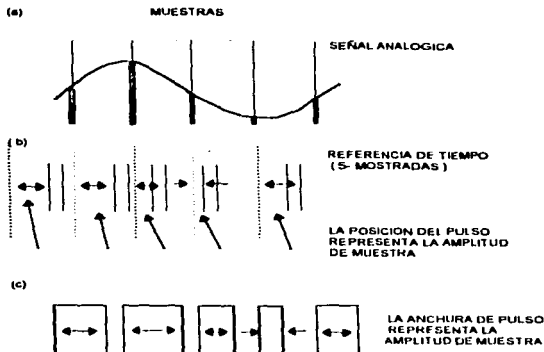
- Modulación de Anchura de Pulsos "PDM".

El ancho del pulso representa la amplitud de la muestra. Una muestra con amplitud más grande produce un pulso más ancho (figura 5.21c)

Para la modulación de la posición de pulsos y la modulación de anchura de pulsos, la amplitud del pulso es inmaterial. Esto es en un pulso o-n - o-ff, su posición o anchura es la información. Estas son algo más susceptibles a la interferencia del ruido que la modulación de pulsos codificados.

#### 5.4 Multiplexado

El propósito fundamental del multiplexado es el de compartir el ancho de banda de un canal de información entre muchos usuarios. Aquí, la fibra es el canal de información; la luz es el portador. Nosotros daremos por hecho que todas las fuentes de información independientes conforman algunos requerimientos por encima de los demás, tales como la amplitud y el ancho de banda



**FIGURA 5.21 MODULACIÓN DE POSICIÓN DE PULSO PPM Y MODULACIÓN DE PULSOS EN ANCHURA PAM.**

**(a) señal analógica y muestras, (b) PPM formas de onda, (c) PAM formas de onda**

#### 5.4.1 Multiplexado por División de Tiempo "TDM".

En la transmisión por multiplexado por división de tiempo, el tiempo en el canal de información es compartido entre muchas fuentes de información. La fuente en este contexto, puede ser información en cualquiera de los formatos de modulación discutidos en la sección previa. Una fuente, por ejemplo, puede ser un tren de pulsos (modulados vía PCM o PAM) que es usado para representar las señales analógicas de entrada (Aunque existen sistemas de multiplexado que multiplexan las señales analógicas directamente, estos no serán discutidos aquí). Las fuentes de información una a la vez, utilizan la fibra para transmitir su información. Por claridad, dé por hecho que la información que cada fuente envía es un hilo de 1's y 0's, pueden ser datos PCM.

En la figura 5.22 da una descripción más detallada del multiplexado por división del tiempo cuando se aplica información digital. Cada fuente es asignada por separado en un momento durante el cual transmite su información. Una a la vez, las cuatro fuentes en la figura 5.22 transmiten su información. Cuando la fuente 4 completa su transmisión, la siguiente vez una abertura es asignada a la fuente 1. (Este esquema de Multiplexado es llamado Multiplexado por División de Tiempo arreglado, debido a que el orden de transmisión está arreglado. Otras técnicas permiten fuentes con más información para transmitir más seguido que las otras). La secuencia fuente 1 hasta la 4 (o fuente 1 hasta

la última fuente involucrada), constituye una estructura. Note que en la figura 5. 22 , la información consiste de agrupamientos de 4 bits

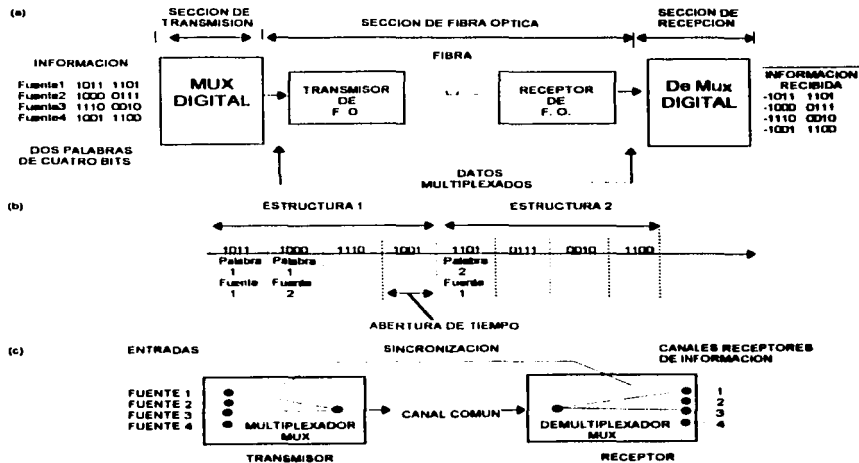


FIGURA 5 22 multiplexado por división de tiempo (a) por diagrama de bloques Multiplexado de datos en abertura de tiempo (c) modelo simplificado de Multiplexado y Demultiplexado.

La figura 5 22 es una sobresimplificación de la operación Multiplexadora. En la práctica cada fuente alimenta a un amortiguador de entrada usado para almacenar temporalmente información de entrada. La información es entonces multiplexada hacia el canal común, la fibra óptica. De esta manera, un canal común de alta velocidad puede ser usado para transmitir un gran número de entradas.

La relación entre el número de canales de entrada Multiplexados  $N$ , la proporción de información de canal de entrada y la proporción de información de salida, (o multiplexada) es dada mediante:

Proporción de salida multiplexadora =  $N \times$  proporción de entrada.

Ecuaación 5.6



La capacidad del canal común conectado a la operación Multiplexadora debe ser igual o mayor que la proporción de salida en la ecuación 5.6. En otras palabras, el canal común debe ser capaz de operar en esta proporción de salida. En la ecuación 5.6 la proporción de información de todos los canales de entrada se da por hecho ser la misma. Para proporciones de entrada variantes, la proporción más alta debe ser usada para determinar la capacidad del canal común (verdadero para multiplexado por división de tiempo solamente). Otro parámetro a menudo mencionado en conexión con TDM es la proporción del switch-*eo* del canal. Esto se refiere al número de entradas visitadas (accedidas) por segundo. (Cada entrada es considerada un canal de información de entrada)

El diagrama de la regulación del tiempo mostrado en la figura 5.22b está incompleto. Las marcas de la regulación del tiempo (señales de sincronización, que encierran una estructura del tiempo) son usualmente agregadas al final (o al principio) de cada abertura del tiempo así como de la estructura, para identificar claramente las estructuras y aberturas del tiempo. El extremo receptor utiliza estas marcas del tiempo para reconstruir la información original.

La figura 5.22c proporciona un modelo simplificado para un sistema de transmisión de operación Multiplexadora. Switches simples en multiposiciones son utilizados para simular el Multiplexado y Demultiplexado. Cuando la operación multiplex está en posición 1, también lo está el switch Demultiplex. Consecuentemente, para la duración de la operación Multiplex y Demultiplex están en la posición 1, la información de la fuente 1 utiliza el canal común para la transmisión 1, la información de la fuente 1 utiliza el canal común para la transmisión. La siguiente abertura es asignada a la fuente 2. Esto significa que ambos, Multiplex y Demultiplex, están en la posición 2 y, así en adelante. Los switches Multiplex y Demultiplex se mueven en sintonía. La fuente 1 es reconectada al canal común de transmisión a continuación de la transmisión de información de la última fuente Multiplex, la fuente 4, en la figura 5.22c.

#### 5.4.2 Multiplexado por División de Frecuencia "FDM".

En el multiplexado por división de frecuencia el ancho de banda del canal de información es dividido dentro de las aberturas de frecuencia (subportadores) y cada fuente es asignada a una subportadora. Un diagrama de bloques de un sistema típico de Multiplexado de división de frecuencia es mostrado en la figura 5.23a. Dé por hecho que un sistema de fibra particular tiene un ancho de banda de 100 MHz. (Eso significa que la luz transmitida puede ser modificada mediante un portador o portadores, con frecuencias de hasta 100 MHz). Entonces procede a asignar diferentes portadores (en este contexto referidos como subportadores) a las diferentes fuentes de información. Como los mostrados en la figura 5.23b las asignaciones a los subportadores están separados mediante bandas guardias. Esto hace más fácil al extremo receptor separar los subportadores.

Como un ejemplo, en la figura 5.23b, todos los subportadores tienen un ancho de banda de 5 MHz. En realidad, la asignación del ancho de banda pudiera variar con la aplicación. Usted hace a la escala de frecuencia en el Multiplexado por división de frecuencia, lo que usted hizo a la escala del tiempo en el Multiplexado por división de tiempo. Cada subportador es modulado mediante su fuente de información, la cual es modulación de amplitud de pulso o modulación de pulsos codificados o cualquier otra información. Usted puede tener tres niveles de modulación. La información analógica modula un tren de pulsos (PAM) que es entonces usado para modular un subportador (AM o FM). Los subportadores modulados combinados modulan la fuente de luz.

Un banco de filtros pasa banda recobran los subportadores originales en el receptor. Estos filtros permiten a un rango limitado de frecuencias pasar sin atenuación. El banco de filtros, aquí, puede consistir en filtros con ancho de banda, como por ejemplo 5 - 10 MHz o 15 - 20 MHz.

En la figura 5 23a , el mezclado de los subportadores es ejecutado en los niveles de señal electrónica. Esto conduce a hablar cruzado, la interferencia de señales de un subportador con otro subportador. El hablar cruzado puede ser eliminado mediante un mezclado del nivel óptico. La figura 5.24 da el diagrama de bloques de tal sistema. Note que el extremo receptor no ha sido cambiado por completo. Cuando multiplexamos al nivel óptico, cada fuente de datos modula un subportador y conduce su propia fuente de luz. Habrá tantas fuentes de luz como fuentes de datos Multiplexados. En el esquema de multiplexado de la figura 5 23 existe solamente una fuente de luz conectada a la fibra. Un relativo número grande de fuentes de luz introduce problemas de saturación en el fotodetector. En otras palabras, si un gran número de entradas están involucradas, cada una con su propia fuente de luz y si usted da por hecho que transmiten simultáneamente el fotodetector receptor (sólo hay uno) es probable que se sature debido a la intensidad de la señal de luz acumulativa. Esto causará distorsión de la señal y que el sistema sea inoperante. En este método, esto significa que deben hacerse restricciones en el número de datos de fuentes involucrados y su máxima intensidad.

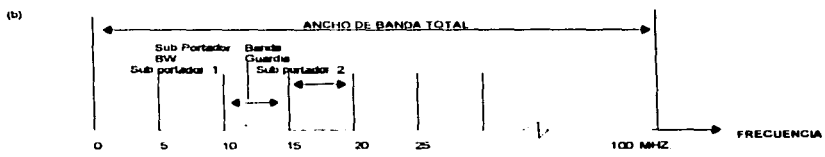
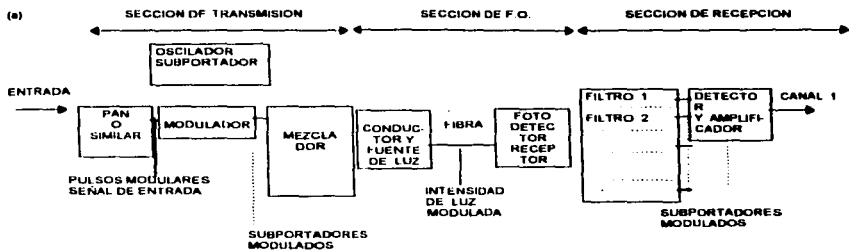


FIGURA 5.23 MULTIPLEXADO POR DIVISION DE FRECUENCIA. ( a ) DIAGRAMA DE BLOQUES ( b ) BANDAS DE FRECUENCIA DE LA SEÑAL TRANSMITIDA.

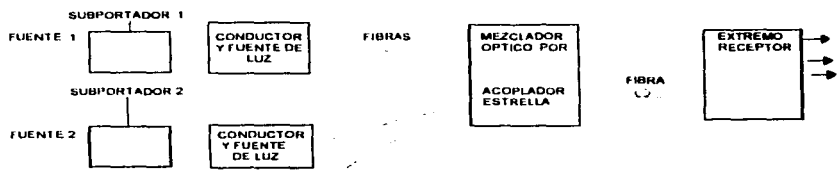


FIGURA 5.24 MULTIPLEXADO POR DIVISION DE FRECUENCIA - MEZCLADO EN EL NIVEL DE SEÑAL OPTICA

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

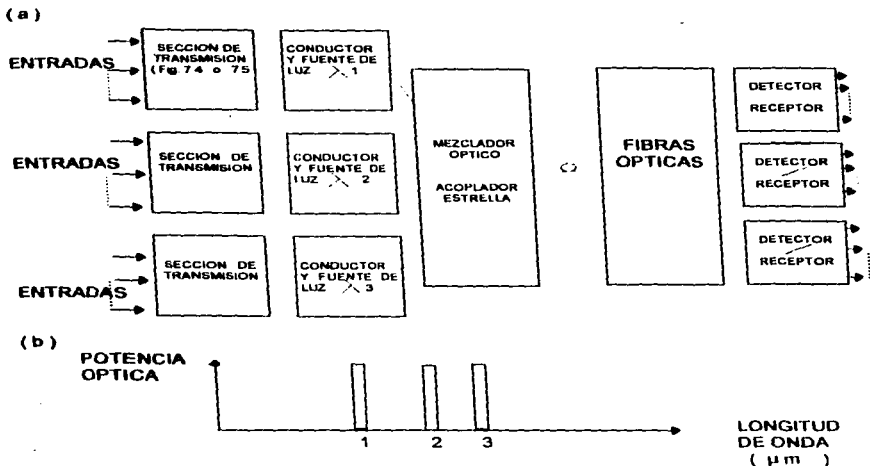


FIGURA 5.25 MULTIPLEXADO POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA (a) diagrama de bloques (b) longitudes de onda típicas transmitidas en la fibra principal.

#### 5.4.3 Multiplexado por división de longitud de onda "WDM"

En el acceso del Multiplexado por división de longitud de onda. Cada fuente de datos (o grupo de fuentes) es asignada a una longitud de onda de transmisión. ( Las diferentes longitudes de onda son a veces referidas como colores, de aquí el término Multiplexado de color). Un diagrama de bloques y un trazo de la longitud de onda se muestran en la figura 5.25.

Típicamente, debido a las complejidades del mezclador óptico, solo dos o tres longitudes de onda pueden ser multiplexadas por ahora. Sin embargo, cada portador de longitud de onda puede ser usado con cualquiera de los esquemas Multiplexados previamente, de esta manera, la capacidad de llevar datos (la proporción de datos por encima de  $\lambda$ ) puede ser incrementada.

Existe poca interferencia entre las señales de entrada multiplexada cuando el multiplexado de la longitud de onda es usado. Como es típico para todo el multiplexado en el nivel óptico, la potencia óptica total transmitida es incrementada cuando el número de fuentes de datos se incrementa. Esto presenta problemas de saturación en el detector óptico.  $\longrightarrow$

(receptor). En el "WDM", sin embargo, las diferentes longitudes de onda de luz (los diferentes colores) son separados ante el detector óptico. Cada longitud de onda es alimentada dentro de un detector diferente y la saturación es improbable. Ambas, "FDM" y "WDM", permiten transmisión simultánea por cualquiera o todas las fuentes de datos, mientras que el TDM requiere que sólo una fuente transmita a la vez.

## BIBLIOGRAFIA

**Fiber optics Communications an other Aplications Zanger/ Zanger**

**Optical fibers Comunications Jhon M. Senior**

**Conductores de fibras ópticas Gunther Nahlke y Peter Gössing**

**Comunicaciones por fibra óptica - Manual de Ingeniería Raimundo Díaz de la Iglesia.**

**Manual de fibras ópticas Teléfonos de México**

**Fibras ópticas Centro de entrenamiento Latinoamericano Ericsson.**

**An Introduction to optical fiber Cherin Allen H.**