



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

**Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.**

**El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.**

**Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.**

**Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.**

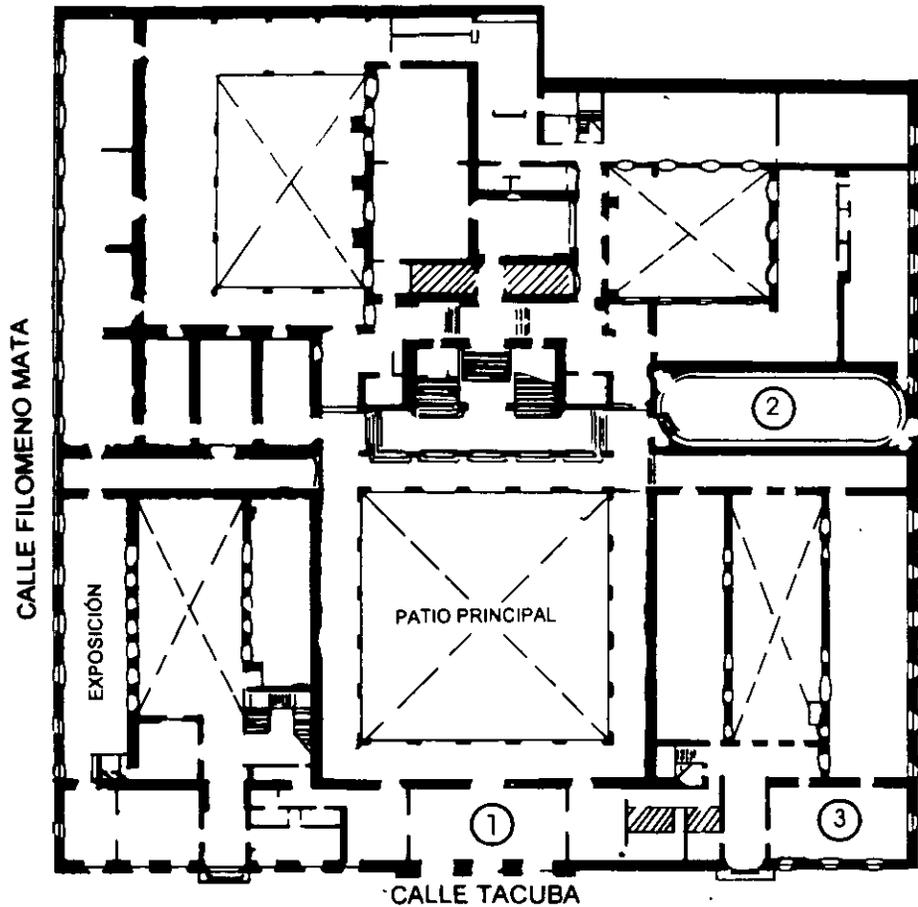
**Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.**

**Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.**

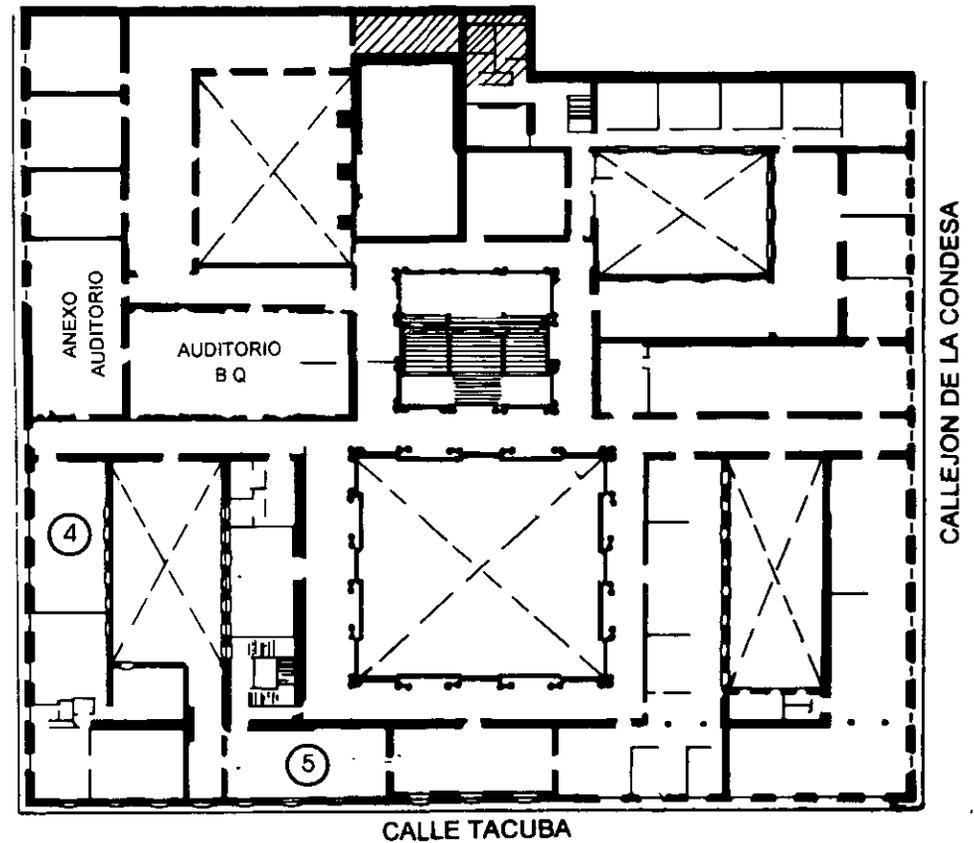
**Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.**

**Atentamente  
División de Educación Continua.**

# PALACIO DE MINERIA

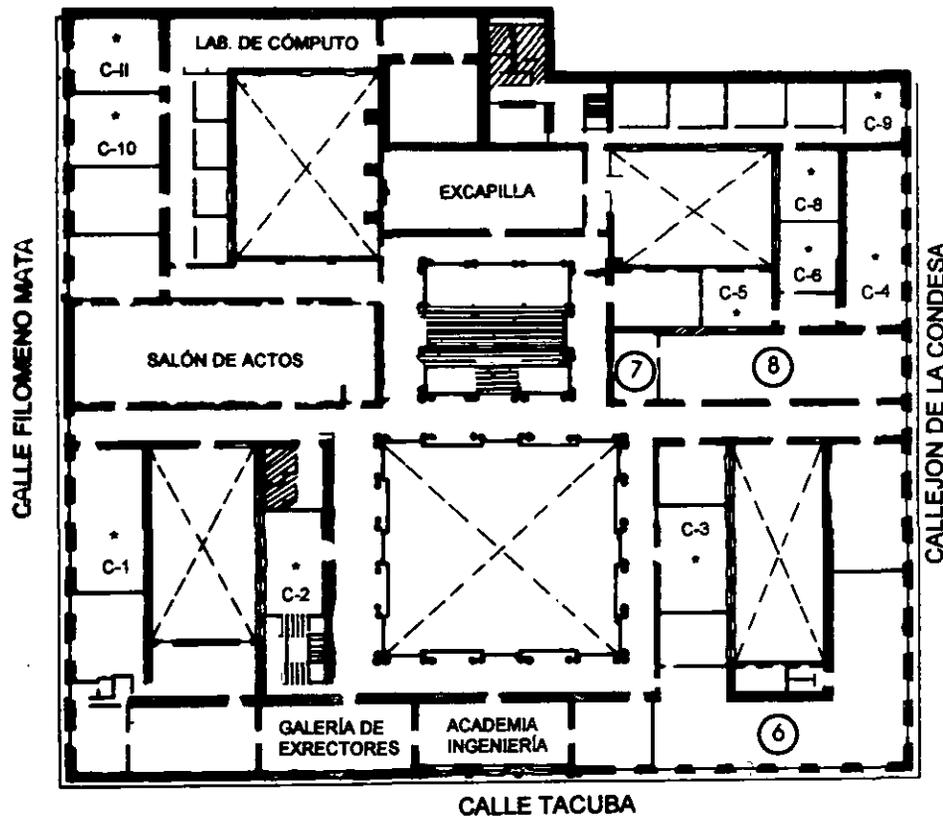


**PLANTA BAJA**



**MEZZANINNE**

# PALACIO DE MINERÍA



## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
  2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
  3. LIBRERÍA UNAM
  4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
  5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
  6. OFICINAS GENERALES
  7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
  8. SALA DE DESCANSO
- SANITARIOS
- \* AULAS

**1er. PISO**



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.  
CURSOS ABIERTOS





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**PROPAGACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS**

**CONFERENCISTA  
DR. FERNANDO MARTÍNEZ P.  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



## INTRODUCCION.

Nuestra sociedad demanda una cantidad siempre creciente de información transmitida a través de diversos medios de comunicación. Los sistemas de comunicación de onda luminosa que utilizan fibras ópticas ofrecen una forma elegante de combinar voz, imágenes y datos en un solo flujo universal.

Las fibras ópticas son filamentos flexibles de pequeña sección transversal (un diámetro externo típico son 0.125 mm) hechas de material dieléctrico transparente tal como vidrio o plástico, y que tienen una variación radial en el índice de refracción que les permite actuar como guías de onda para la luz.

La cantidad de información que un sistema de comunicación puede transportar es aproximadamente proporcional a la frecuencia de la portadora. En el caso de los sistemas de comunicación por onda luminosa la frecuencia de la portadora es del orden de 300 000 GHz y el ancho de banda potencial es de 25000 GHz en el rango de longitudes de onda de 1.45-1.65 $\mu\text{m}$  [1].

Los sistemas de comunicación por onda luminosa se han convertido en una tecnología esencial y crítica para el sector de telecomunicaciones. Las fibras ópticas son ya un medio de transmisión competitivo y efectivo en costo en muchas aplicaciones además, debido a su enorme ancho de banda potencial, las fibras ópticas ofrecen la flexibilidad necesaria para acomodar tasas mas altas de transmisión conforme la tecnología avanza.

La primera propuesta sería de utilizar las fibras de vidrio como guía de onda se remonta a 1966 [2]. Desde entonces, la tecnología de onda luminosa ha avanzado dramáticamente. Se pueden identificar dos generaciones de sistemas. Los sistemas de la primera generación emergieron comercialmente en 1980 [3] y empleaban fibras multimodales de índice gradual, láseres semiconductores en las longitudes de onda cortas de 0.82-0.9 $\mu\text{m}$ , tasas de transmisión de 8-140 Mb/s en Europa (6-90 Mb/s en los Estados Unidos) y un esparcimiento entre repetidores de 5-10 km. Fue entonces cuando se puso de manifiesto que casi todas las propiedades de las fibras ópticas eran mejores a las longitudes de onda largas de 1.3 a 1.5)  $\mu\text{m}$ .

La combinación de la dispersión de material cero o casi cero y la atenuación ,más baja (0.2-1.0 dB contra 2-5 dB /km. en el rango 0.82-0.9  $\mu\text{m}$ ) ofrecían la promesa de una mayor simplicidad en los sistemas junto con una mayor capacidad de transmisión. El uso de fibras ópticas unimodales evitaron el problema de dispersión multimodal. Los sistemas de segunda generación , empezaron a producirse en 1985, usando fibras ópticas unimodales operando a



la longitud de onda de  $1.3\mu\text{m}$  ya tasas de transmisión de 100-600 Mb/s con un esparcimiento típico entre repetidores de 25-30 km.

Los avances continúan hoy mas allá de los sistemas de segunda generación. Fibras típicas de producción de alta calidad exhiben pérdidas mínimas cercanas a los 0.2 dB/km [Li, 1985] a  $1.55\mu\text{m}$ . Sin embargo, la dispersión total puede ser alta en esta longitud de onda ( 20 ps/(nm.km) ) para fibras convencionales de índice escalonado cuyas características de dispersión no se han modificado [Midwinter, 1985]. Para maximizar el esparcimiento entre repetidores existen dos técnicas:

- 1) Desarrollar láseres con un ancho espectral de línea muy angosto o
- 2) Optimizar el diseño de las fibras para reducir la dispersión. Siguiendo la primera técnica se han desarrollado con éxito experimentos de tasas de transmisión a tasas mayores de 1 Gb/ , sobre fibras unimodo que exceden 100 km de longitud.

Sin embargo, láseres de anchos de línea angostos son difíciles de producir y requieren un control preciso durante su operación que es difícil de lograr fuera del laboratorio [Lemrow, 1985]. La segunda técnica tiene mejores perspectivas a corto plazo y ha resultado en varios diseños para correr el mínimo de dispersión hacia la longitud de onda de  $1.55\mu\text{m}$  y para minimizar la dispersión en el rango 1.2- 1.6  $\mu\text{m}$  de longitud de onda [Kalish, 1987].

Como una analogía notable para ayudar a comprender el significado de una tasa de transmisión de 1.7 Gb/s ( AT&T Sistema FT serie G, ruta Filadelfia - Chicago, 1987) puede decirse que a esa tasa de bits sería posible transmitir el contenido entero de la Enciclopedia Británica en menos de dos segundos [Sanferrare, 1987].

Aplicaciones a las comunicaciones por onda luminosa incluyen el cable óptico trasatlántico TAT-8 que empezó a operar a finales de 1988 y que proporcionan servicios digitales de banda ancha que rivalizan con los enlaces de comunicación vía satélite . Las fibras ópticas unimodales prometen ser también, elementos clave para la Red de Servicios Integrados(ISDN) del futuro a través de su uso en el lazo del abonado y en redes locales.

Una nueva tecnología de sensores basado en fibras ópticas está emergiendo. Los sensores de fibra óptica trabajan a través de la alteración de la luz mediante estímulos externos y virtualmente puede detectarse cualquier estímulo tal como temperatura, presión, posición, desplazamiento, vibración, rotación, campos magnéticos y eléctricos, etc., y en muchas aplicaciones ofrecen mejores características que otros sensores [Giallorenzi, 1986]. Los sensores de fibras ópticas están encontrando aplicaciones en áreas tales como instrumentación industrial, de laboratorio, química y medica, en control de procesos, plantas eléctricas, aereoespacio, etc.



Nuevos tipos de fibras ópticas se han introducido en años recientes. Estas incluyen fibras altamente birrefringentes [Varnham, 1983], para usarse donde se requiera mantener el estado de polarización, y fibras dopadas con tierras [Poole, 1986]. Usando estas últimas, láseres de fibra óptica [Mears, 1985], amplificadores de fibra óptica [Mears, 1988] y sensores de temperatura [Farries, 1986] han sido demostrados.

En esta parte del curso se presentan los conceptos básicos de propagación de la luz en fibras ópticas mediante la exposición y discusión de la estructura de una fibra óptica, la teoría de transmisión de rayos, la teoría modal de propagación, y mediante breve discusión de cada uno de los tipos de fibra, es decir, de las fibras multimodales tanto de índice escalonado como de índice gradual, y de las fibras unimodales de índice escalonado, de índice gradual, de tipo W y finalmente, de las que preservan el estado de polarización de la luz.

### Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica está constituida de un material dieléctrico interno llamado núcleo (core) el cual está rodeado de otro dieléctrico llamado revestimiento (cladding) con un índice de refracción menor. Una envoltura plástica (coating) se aplica al exterior de la fibra para proteger a la misma contra daños mecánicos (ralladuras, raspadura, desgastes, etc.), contra la humedad y ambientes que puedan debilitar la fibra. También sirve para evitar el cruce de señales (cross talk) con otras guías de luz [Sams, 1987]. La Fig. 1 muestra esquemáticamente la estructura de una fibra óptica.

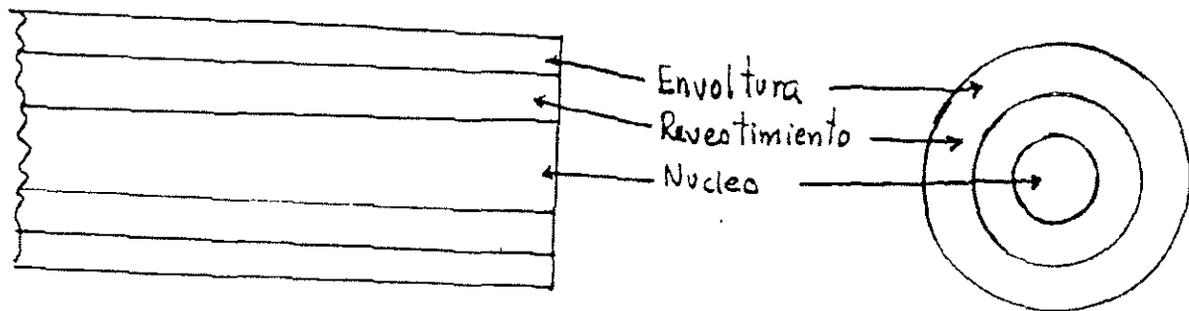


Fig. 1.- Estructura física de una fibra óptica.

Una fibra óptica actúa como una guía de onda luminosa y puede ser analizada utilizando la teoría de transmisión de rayos lo que tiene como ventaja ser un método relativamente simple y para muchos casos proporciona una buena representación. Sin embargo, los conceptos de óptica geométrica no son suficientes cuando se consideran todos los tipos de fibras ópticas y



los distintos fenómenos de propagación de la luz como distribución de campo, conversión de modos, acoplamiento de modos y, frecuencias de corte los que son difíciles de explicar utilizando un tratamiento de, óptica geométrica pura por lo que la teoría modal electromagnética debe ser usada en estos casos para la obtención de un análisis completo. A continuación se presentan las bases de ambos métodos. [Senior, 1985, Sams, 1989].

## TEORIA DE TRANSMISION DE RAYOS

### Reflexión interna total

Para considerar la propagación de luz dentro de una fibra óptica utilizando el modelo de la teoría de rayos es necesario tomar en cuenta el índice de refracción del medio dieléctrico.

El índice de refracción se define como la razón de el vacío a la velocidad de la luz en el medio.

$$n = c/v$$

(1)

Un rayo de luz viaja más lentamente en un medio óptico denso que en uno que es menos denso y el índice de refracción da una medida de este efecto.

Cuando un rayo de luz incide en la interface entre dos dieléctricos de diferente índice de refracción ( como por ejemplo vidrio - aire), la refracción ocurre como se ilustra en Fig. 2.2

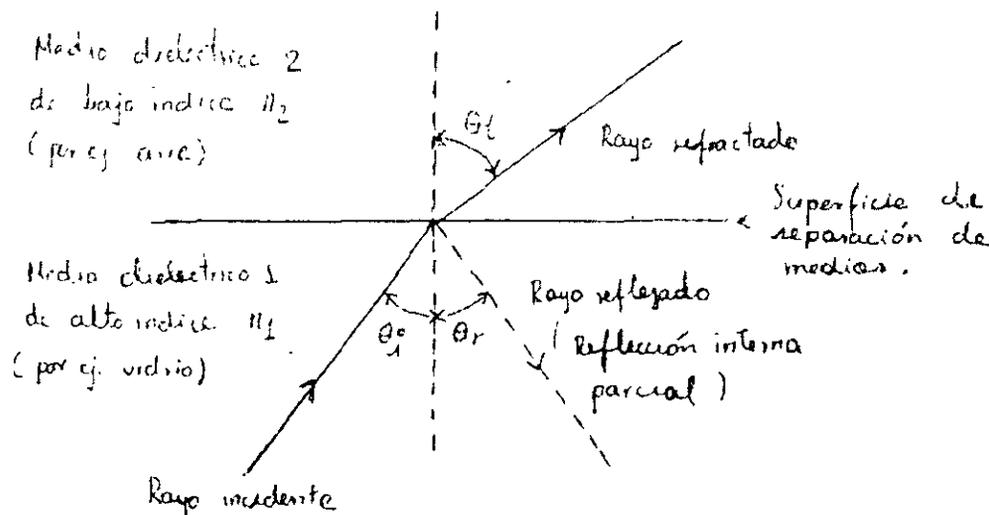


Fig. 2.2 - Refracción de rayos de luz que inciden en una interfaz de un medio de alto índice de refracción a uno de bajo índice de refracción, (por. ej. vidrio - aire).



La relación entre los rayos reflejado y refractado esta dada por las leyes de reflexión que se enuncian a continuación:

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado están contenidos en un mismo plano, llamado plano de incidencia, que es normal a la superficie de separación de medios y por lo tanto contiene a la normal  $N$  a la superficie.
2. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

3. Los ángulos de incidencia y refracción están relacionados por la ley de Snell.

$$\frac{\text{sen } \theta_t}{\text{sen } \theta_i} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Si el dieléctrico en el otro lado de la interfaz tiene un índice de refracción  $n_2$  que es menor que  $n_1$  entonces:  $\theta_t$  es mayor que  $\theta_i$  (Un índice de refracción  $n_2$  mayor que  $n_1$  implicaría que  $\theta_t$  sería menor que  $\theta_i$ ).

Existe una pequeña cantidad de luz que es reflejada hacia el medio dieléctrico de origen. Esta es una reflexión interna parcial.

Como  $n_1$  es más grande que  $n_2$ , el ángulo de refracción siempre es más grande que el ángulo de incidencia. De esta forma cuando el ángulo de refracción es  $90^\circ$  y el rayo refractado emerge paralelo a la interfaz entre los dieléctricos el ángulo de incidencia debe ser menor que  $90^\circ$ . Este es el caso límite de refracción y el ángulo e incidencia se conoce como ángulo crítico  $\theta_c$  como se muestra en la Fig. 3

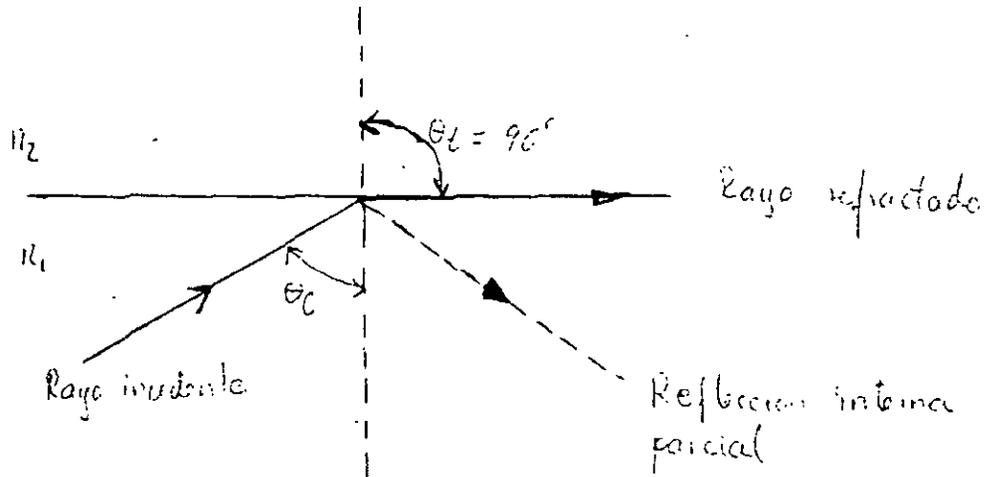


Fig. 3.- Caso límite de refracción que muestra el rayo de incidencia el ángulo crítico  $\theta_c$ .

De Ecuación (3) el ángulo crítico esta dado por:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

A ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico la luz se refleja nuevamente hacia el medio dieléctrico de origen con una eficiencia del orden de 99.9% lo que se conoce como reflexión interna total. En la Fig.4, se ilustra este fenómeno. Este es el fenómeno mediante el cual la luz con ángulos suficientemente pequeños (menos que  $90^\circ - \theta_c$ ) se propagan a lo largo de una fibra óptica con poca atenuación.

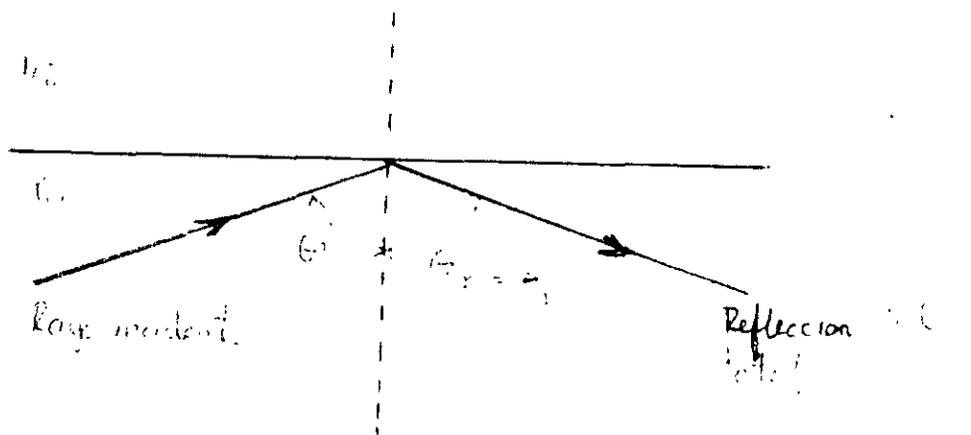
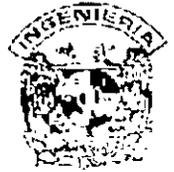


Figura 4.- Reflexión interna total cuando  $\theta_i > \theta_c$



En la Fig. 5 se muestra la transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica a través de una serie de reflexiones internas totales en la interfaz del núcleo de sílice y el revestimiento de sílice con un índice de refracción ligeramente menor. El rayo tiene un ángulo de incidencia en la interfaz el cual es mayor que el ángulo crítico y es reflejado al mismo ángulo con respecto a la normal.

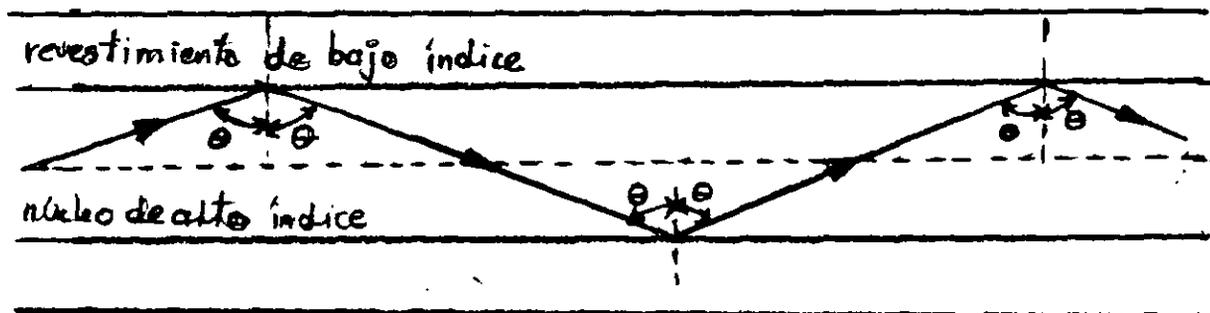


Fig.5 Transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal.

El rayo de luz que se muestra en la Fig. 5 se conoce como rayo meridional se define como el rayo que pasa por el eje del núcleo de la fibra.

### Angulo de aceptación y apertura numérica.

La geometría involucrada con un rayo de luz que se acopla a una fibra óptica se muestra en la Fig. 6 la cual ilustra un rayo meridional A con el ángulo crítico  $\theta_c$  dentro de la fibra en la interfaz núcleo - revestimiento Este rayo ingresa a núcleo de la fibra con un ángulo  $\theta_a$  con respecto al núcleo de la fibra y se refracta en la interfaz aire - núcleo antes de transmitirse hacia la interfaz núcleo - revestimiento con el ángulo crítico.

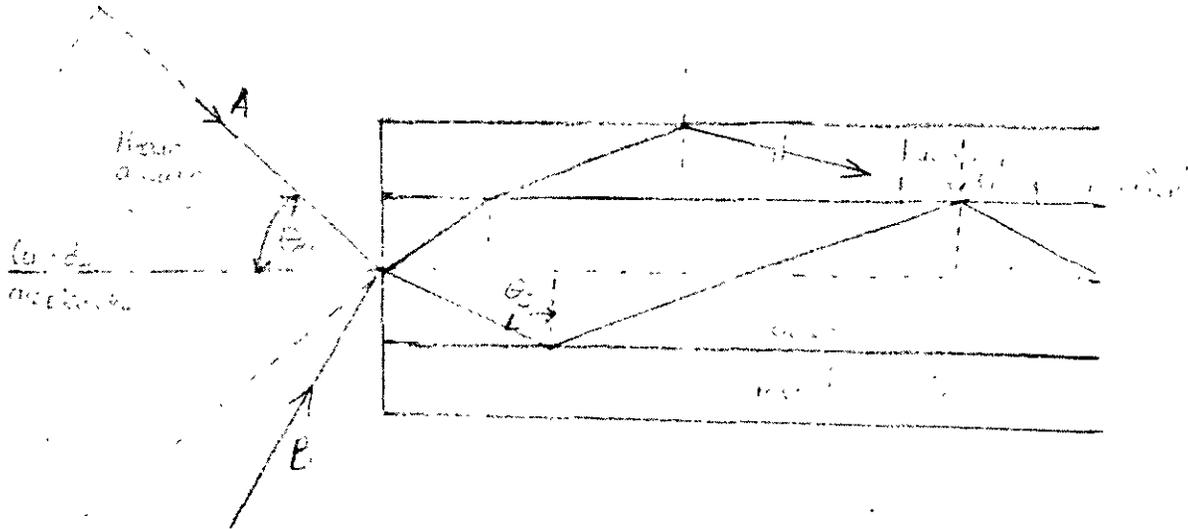
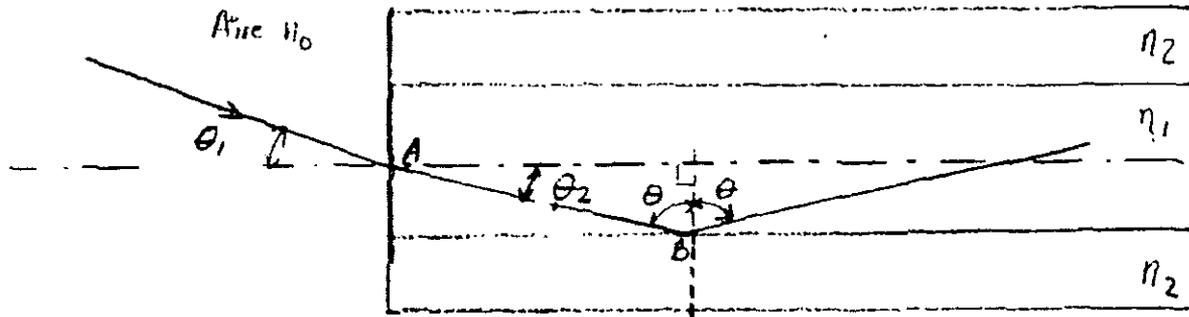


Fig. 6.- Angulo de aceptancia.

Los rayos que inciden en el núcleo de la fibra con un ángulo mayor que sea (por ej. rayo B de la Fig.6 ) serán transmitidos a la interfaz núcleo - revestimiento con un ángulo menor que  $\theta_c$  y no serán reflejados interna y totalmente y eventualmente serán perdidos por radiación. De esta forma para que los rayos sean transmitidos por reflexión interna total dentro del núcleo de la fibra se requiere que incidan en el núcleo de la fibra dentro de un cono de aceptación definido por el ángulo cónico medio  $\theta_a$  o ángulo de aceptación total.

A continuación se obtiene la relación entre el ángulo de aceptación y los índices de refracción de los tres medios involucrados es decir núcleo, revestimiento y aire. Esto conduce a la definición del término más comúnmente utilizado de apertura numérica (NA) de la fibra.

La fig. 7 muestra un rayo de luz que incide en la figura con un ángulo  $\theta_1$  con respecto al eje de la fibra y que es menor que el ángulo de aceptación  $\theta_a$ . El rayo ingresa a la fibra desde un medio (aire) de índice de refracción  $n_0$  y el núcleo de la fibra tiene un índice de refracción  $n_1$  que es ligeramente mayor que el índice de refracción del revestimiento  $n_2$ .



**Fig. 7.- Trayectoria de un rayo meridional acoplado a una fibra óptica con un ángulo menor al ángulo de aceptación de la fibra.**

Utilizando la ley de Snell dada por la Eq. (3) para la interfaz aire – núcleo podemos escribir:

$$n_0 \text{sen} \theta_1 = n_1 \text{sen} \theta_2$$

Considerando el triángulo rectángulo ABC indicado en la Fig. 7 entonces:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_2$$

(5)

$$\text{sen} \theta_2 = \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)$$

$$= \text{sen} \frac{\pi}{2} \cos \theta = \text{sen} \theta \cos \frac{\pi}{2}$$

$$\text{sen} \theta_2 = \cos \theta$$

La Eq. (5) entonces se convierte en:

$$n_0 \text{sen} \theta_1 = n_1 \cos \theta \quad (6)$$

usando la relación trigonométrica  $\text{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ , se obtiene:

$$\cos \theta = (1 - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}$$



por lo que la Eq.(6) se puede escribir como:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (7)$$

El caso límite se considera para reflexión interna total y en este caso  $\theta = \theta_c$ . También en el caso límite  $\theta_1 = \theta_a$ . Combinando estos dos casos límites se tiene

$$\sin \theta = \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n_2^2}{n_1^2}$$

$$(1 - \sin^2 \theta)^{1/2} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1}$$

sustituyendo esta última relación en la Eq (7) nos da:

$$n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

Esta ecuación sirve como base para definir el importante parámetro de apertura numérica NA:

$$NA = n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (9)$$

Ya que la NA se usa frecuentemente con la fibra en el aire entonces  $NA = \sin \theta_a$

La apertura numérica también se da en términos de la diferencia relativa de índices de refracción  $\Delta$  la cual se define como:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{para } \Delta \ll 1 \quad (10)$$

Combinando Eq. (9) con Eq. (10) podemos escribir.



$$NA \approx n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (11)$$

Las relaciones dadas por las ecuaciones (9) y (11) para la apertura numérica son muy útiles para medir la capacidad de captación de luz de una fibra.

### Ejemplo

Una fibra óptica de sílice tiene un índice de refracción en el núcleo de 1.50 y un índice de refracción en el revestimiento de 1.47.

Determinar: (a) el ángulo crítico en la interfaz núcleo - revestimiento; (b) la NA de la fibra y (c) el ángulo de aceptación en aire para la fibra.

Solución: El ángulo crítico  $\theta_c$  en la interfaz núcleo - aire está dado por Eq. (4) donde

$$\begin{aligned} \theta_c &= \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = \text{sen}^{-1} \left( \frac{1.47}{1.50} \right) \\ &= 78.5^\circ \end{aligned}$$

(b) De la Eq (9) la apertura numérica es

$$\begin{aligned} NA &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (1.50^2 - 1.47^2)^{1/2} \\ &= (2.25 - 2.16)^{1/2} \\ &= 0.30 \end{aligned}$$

(c) De la Ec. (9) el ángulo de aceptación en el aire está dado por  $\theta_a = \text{sen}^{-1} NA = \text{sen}^{-1} 0.30 = 17.4^\circ$

### **Rayos Oblicuos**

Existe otra categoría de rayos los cuales se transmiten sin pasar a través del eje de la fibra. Estos rayos superan en número a los rayos meridionales, siguen una trayectoria helicoidal a través de la fibra y se les conoce como rayos oblicuos (skew rays). La trayectoria helicoidal trazada por los rayos oblicuos a través de la fibra da un cambio de dirección de  $2\gamma$  en cada reflexión.  $\gamma$  es el ángulo entre la proyección del rayo en dos dimensiones y el radio del núcleo de la fibra en el punto de reflexión. Contrastando con los rayos meridionales, el punto de salida de los rayos oblicuos dependerá del número de reflexiones sufridas más que de las condiciones de entrada a la fibra. Cuando la entrada de luz a la fibra no es uniforme, los



rayos oblicuos producirán un efecto de balance en la distribución de la luz cuando esta se transmite dando lugar a una salida mas homogénea Para mas información sobre este tema véase por ejemplo el libro "Optical Fiber Communications" citado en la bibliografía.

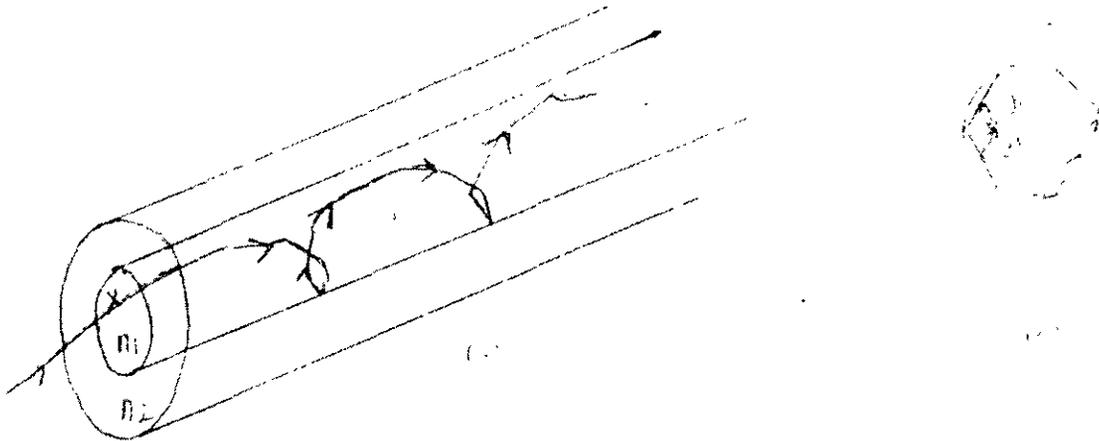


Figura 8.- (a) Trayectoria helicoidal seguida por un rayo oblicuo en una fibra óptica; (b) vista transversal de la fibra.

### TEORIA MODAL ELECTROMAGNETICA DE PROPAGACION OPTICA.

Para obtener un mejor modelo de propagación de la luz en fibras ópticas es necesario recurrir a un análisis de teoría electromagnética. La base para el estudio de propagación electromagnética esta dada por las ecuaciones de Maxwell. El resultado de combinar dichas ecuaciones lo constituye la ecuación escalar de onda la cual se puede expresar tanto en coordenadas cartesianas (x, y, z) en el caso de guías de onda planas como en coordenadas polares cilíndricas (r,  $\phi$ , z) en el caso de fibras circulares.

La solución básica de la ecuación de onda es una onda senoidal. La onda plana uniforme esta dada por:

$$\psi = \psi_0 \cdot \exp(j(\omega t - k \cdot r)) \quad (12)$$



donde  $\psi$  representa una componente del campo eléctrico  $E$  o del campo magnético  $H$ ,  $w$  es la frecuencia angular del campo,  $t$  es el tiempo,  $k$  es el vector de propagación que nos da la dirección de propagación y la tasa de cambio de fase con la distancia y  $r$  especifica el punto coordinado en el cual se observa el campo. Cuando  $\lambda$  es la longitud de onda óptica en el vacío, la magnitud del vector de propagación o constante de propagación en el vacío  $k$  (donde  $k = |k|$ ) esta dada por

$$k = 2\pi / \lambda \quad (13)$$

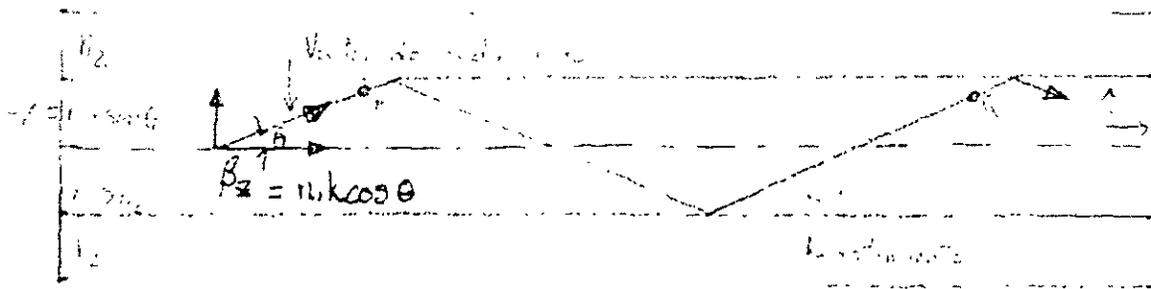
$k$  se conoce también en este caso como el numero de onda en el espacio libre.



## Guía de onda plana y concepto de modos.

La guía de onda plana es la forma más simple de guía de onda óptica y puede servir de base para comprender la propagación electromagnética en fibras ópticas. Esta guía de onda consiste de un medio dieléctrico con índice de refracción  $n_1$  situado entre dos regiones de índice de refracción menor  $n_2$ .

La transición de la teoría de rayos a la teoría de ondas puede realizarse considerando una onda monocromática plana que se propaga en la dirección de la trayectoria del rayo dentro de la guía como se muestra en la Fig. 9.



**Figura 9.- Propagación de una onda plana en una guía. El vector de onda corresponde a un rayo equivalente.**

El índice de refracción en la guía es  $n_1$ , la longitud de onda óptica se reduce a  $\lambda/n$  mientras que la constante de propagación se incrementa a  $n_1 k$ .  $\theta$  es el ángulo entre el vector de propagación o rayo equivalente y el eje de la guía por lo que la onda plana puede resolverse en dos ondas planas componentes que se propagan en la dirección  $z$  y  $x$  como se muestra en la Fig. 9. La componente de la constante de propagación en la dirección  $z$   $\beta_z$  esta dada por:

$$\beta_z = n_1 k \cos \theta \quad (14)$$

La componente de la constante de propagación en la dirección  $x$   $\beta_x$  es:

$$\beta_x = n_1 k \sin \theta \quad (15)$$



El componente de la onda plana en la dirección  $x$  se refleja en la interfaz dieléctrica. Cuando el cambio de fase entre dos reflexiones sucesivas (entre los puntos  $P$  y  $Q$ ) es igual a  $2m\pi$  radianes, donde  $m$  es un entero, entonces interferencia constructiva ocurre y una onda estacionaria se obtiene en la dirección  $x$ . Esto sugiere un fenómeno de resonancia del campo electromagnético en una cavidad, en este caso una guía de onda.

La onda óptica queda efectivamente confinada dentro de la guía distribución de campo eléctrico en la dirección  $x$  no cambia conforme la se propaga en la dirección  $z$ . La distribución estable de campo en dirección  $x$  con solo una dependencia periódica de  $z$  se conoce como modo.

En la Fig. 10a se ilustra la onda estacionaria de orden mas bajo ( $m=0$ ) en la cual el campo eléctrico es un máximo en el centro de guía y decae a cero en la frontera entre la guía y el revestimiento. El campo eléctrico penetra cierta distancia en el revestimiento lo que se conoce como campo evanescente.

Un modo específico se obtiene cuando el ángulo entre los vectores de propagación o rayos y la interfaz tienen un valor particular lo que origina que la luz que se propaga dentro de la guía se forma en modos discretos cada uno tipificado por un valor distintivo de  $\theta$ .

Los modos de propagación tienen una dependencia de la forma  $\exp(-j\beta_z z)$  donde  $\beta_z$  es la constante de propagación. Por simplicidad  $\beta_z = \beta$ . Si suponemos una dependencia temporal para el campo electromagnético con frecuencia angular  $\omega$  de  $\exp(j\omega t)$  entonces el factor combinado  $\exp(j\omega t - \beta z)$  describe un modo de propagación en la dirección  $z$ .

Las Fig. 10b-d muestran los rayos correspondiente a ondas planas con ángulos específicos diferentes y sus patrones de onda estacionaria a través de la guía que siguen una fórmula seno o coseno. Puede observarse que el número  $m$  denota el número de ceros en el patrón de campo transversal.

Cabe hacer notar que la aproximación de teoría de rayos para el modo fundamental es la menos adecuada en el análisis de óptica geométrica.

La luz es una onda electromagnética que consiste de un campo eléctrico  $E$  y un campo magnético  $H$  que varían periódicamente y que son ortogonales entre si. Los modos transversales que se muestran en la fig. 10 ilustran el caso cuando el campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación y de aquí que  $E_z = 0$ , pero una componente correspondiente de campo magnético  $H_z$  se encuentra en la dirección de propagación. En este caso se dice que los modos son transversales eléctricos (TE). Alternativamente, cuando



el componente  $H_z$  del campo E esta en la direcci6n de propagaci6n, pero  $H_z = 0$ , los modos as4 formados se llaman transversales magn6ticos (TM).

Los n6meros de modos se incorporan en esta nomenclatura refiri6ndonos a los modos como  $TE_m$  y  $TM_m$ .

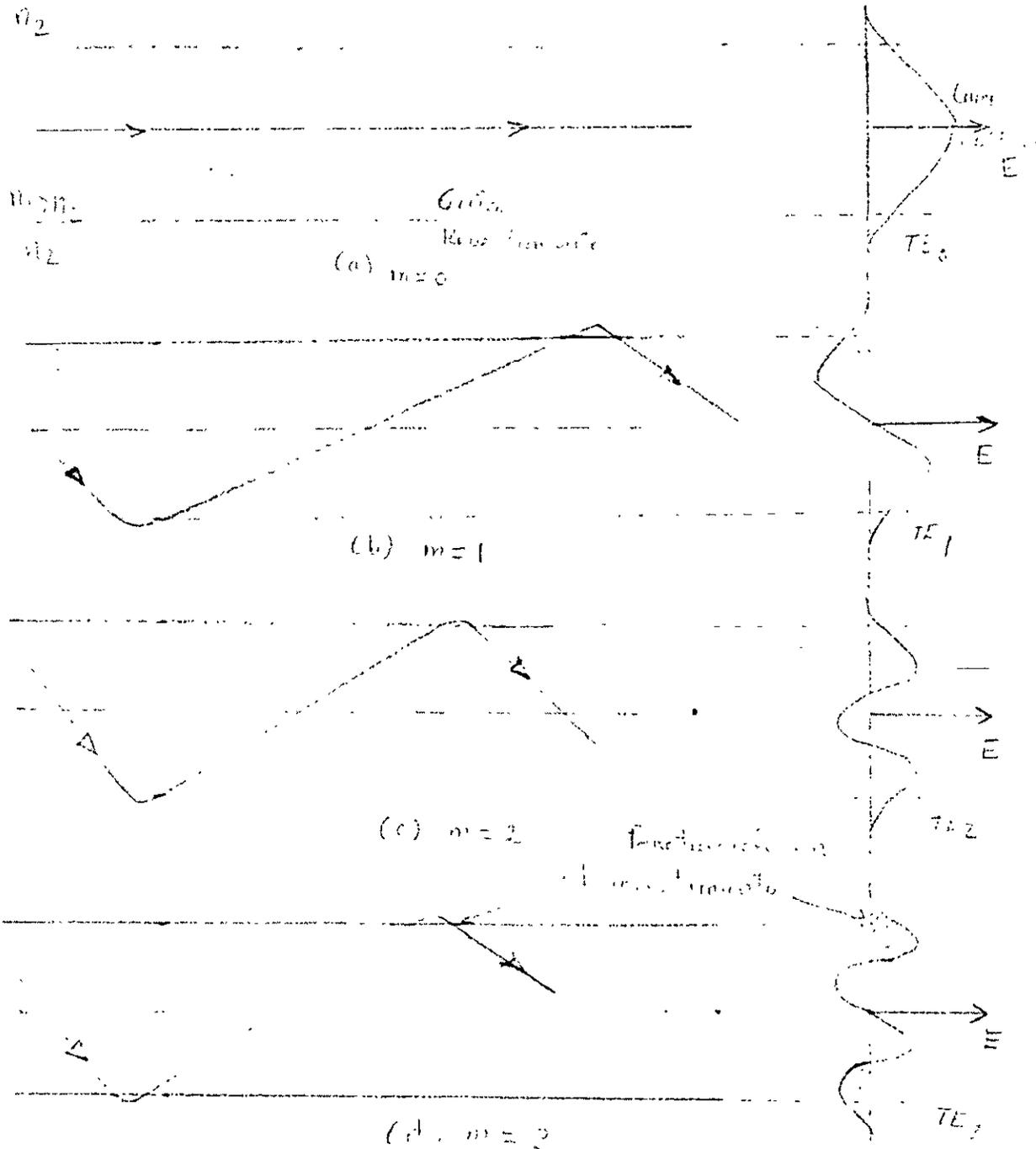


Figura 10. Modelo físico que muestra la propagación de rayos y los correspondientes



## patrones de campo eléctrico (TE) para los cuatro órdenes inferiores ( $m = 0,1,2,3$ ) en la guía de onda dieléctrica plana.

Cuando el campo total esta sobre el plano transversal, ondas electromagnéticas transversas (TEM) existen y  $E_z$  y  $H_z$  son cero. Las ondas TEM que ocurren en conductores metálicos (por ejemplo en cables coaxiales) rara vez se encuentran en guías de onda óptica. [Senior, 1985].

### FIBRAS DE INDICE ESCALONADO

La fibra óptica considerada en las secciones previas con un núcleo de índice de refracción constante  $n_1$  y un revestimiento de índice de refracción inferior  $n_2$  se conoce como fibra de índice escalonado. La Fig. 11 muestra los tipos de fibra de índice escalonado. El índice de refracción se define como:

$$N(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \text{ (núcleo)} \\ n_2 & r > a \text{ (revestimiento)} \end{cases} \quad (16)$$

La Fig. 11a muestra una fibra de índice escalonado multimodal con un diámetro de núcleo de aprox.  $50 \mu\text{m}$  el cual es lo suficientemente grande para permitir la propagación de muchos modos en el núcleo de la fibra. Esto se ilustra en la Fig. 11a por las muchas trayectorias posibles diferentes de los rayos a través de la fibra. La Fig. 11b muestra una fibra de índice escalonado unimodal (o "monomodal") la que permite la propagación de un solo modo ( $HE_{11}$ ) y de aquí que el diámetro del núcleo debe ser del orden de 4 a  $10 \mu\text{m}$ . La propagación de un modo único se ilustra en la Fig. 11 como un solo rayo axial a través de la fibra.

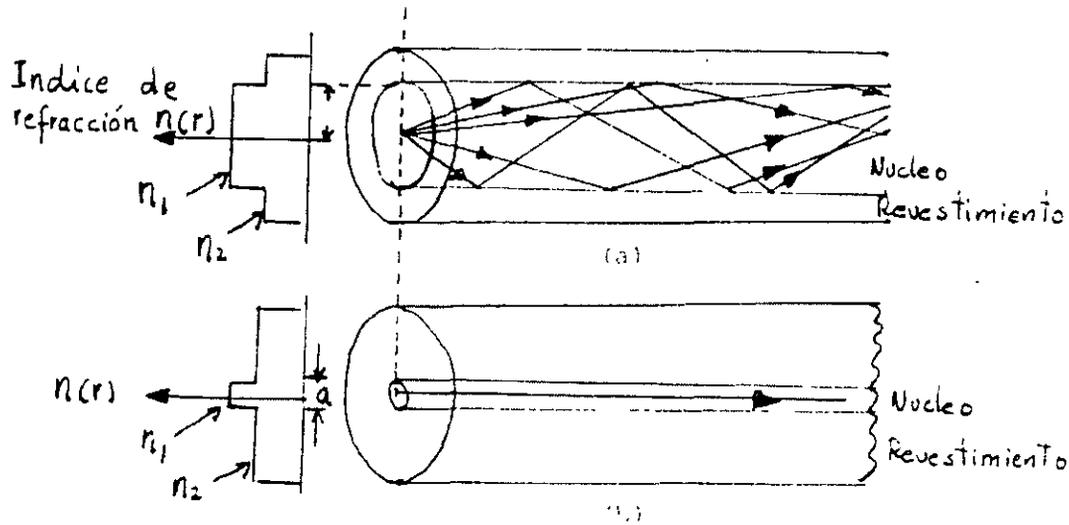


Fig. 11.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos para fibras de índice escalonado (a) fibra de índice escalonado multimodo y (b) fibra de índice escalonado unimodo.

La fibra óptica unimodal tiene la distintiva ventaja de muy baja dispersión modal (ensanchamiento de los pulsos transmitidos) mientras que en la fibra de índice escalonado multimodal ocurre considerable dispersión debido a las diferentes velocidades de propagación de los modos. Esto restringe el máximo ancho de banda que se puede conseguir con fibras de índice escalonado multimodales especialmente cuando se compara con fibras unimodales. Sin embargo, las ventajas de las fibras multimodales son:

- (a) El uso de fuente ópticas incoherentes (por ej. diodos emisores de luz) los cuales no pueden ser acoplados eficientemente a fibras unimodales.
- (b) Aperturas numéricas y núcleos grandes lo que hace más fácil el acoplamiento a fuentes ópticas.
- (c) Requisitos modestos para tolerancia en conectores.

### Fibras multimodales de índice escalonado.

El número de modos guiados depende de los parámetros físicos (es decir, diferencia relativa de índice radio del núcleo  $a$ ) de la fibra longitud de onda de la luz transmitida los cuales están incluidos en la definición de la frecuencia normalizada  $v$ :



$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$
$$= \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (17)$$

Se puede demostrar que el número total de modos en una fibra de índice escalonado se relaciona con el valor V mediante la expresión aproximada:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (18)$$

Ejemplo: Una fibra óptica con un diámetro de núcleo de 80  $\mu\text{m}$  y una diferencia relativa de índice de refracción de 1.5% opera a la longitud de onda de 0.85  $\mu\text{m}$ . Si el índice de refracción del núcleo es 1.48, estimar: (a) la frecuencia normalizada de la fibra y (b) el número de modos guiados.

Solución: La frecuencia normalizada se obtiene utilizando Eq.(18) :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{1/2} = \frac{2 \times \pi \times 40 \times 10^{-6} \times 1.48}{0.85 \times 10^{-6}} (2 \times 0.015)^{1/2}$$
$$= 75.8$$

(b) El número total de modos guiados está dado por la Ec.(18):

$$M_s \approx \frac{V^2}{2} = \frac{5745.6}{2}$$
$$= 2873$$

Como se ilustran en el ejemplo anterior, la potencia óptica se acopla a un gran número de modos guiados cada uno teniendo diferentes distribuciones espaciales de campo, constantes de propagación, etc.

En una fibra ideal no existe acoplamiento entre modos y la potencia óptica acoplada a un modo en particular permanece en ese modo y viaja independientemente de los otros modos guiados. Sin embargo, perturbaciones en la guía de onda tal como- desviaciones del eje de la fibra, variaciones en el diámetro del núcleo, irregularidades en la interfaz núcleo-



revestimiento, producirán conversión de energía entre modos y afectarán las propiedades de transmisión de las fibras ópticas.

### Fibras unimodales de índice escalonado.

Nota: El análisis de fibras ópticas se simplifica considerablemente utilizando el hecho de que la diferencia relativa de índices de refracción  $\Delta \ll 1$ . A esto se le conoce como aproximación de onda escalar o aproximación de guiado débil. De esta forma soluciones aproximadas para el conjunto completo de modos HE, EH, TE y TM pueden darse mediante dos componentes polarizados linealmente. Estos modos polarizados linealmente (LP) no son modos reales de la fibra pero representan una excelente aproximación.

Para operación en modo único, solo el modo fundamental  $LP_{01}$  debe existir. De aquí que el límite de operación unimodal depende del límite propagación guiada modo  $LP_{11}$ . La frecuencia normalizada de corte para el  $LP_{11}$  ocurre a  $V = 2.405$ . Por lo tanto, propagación unimodal es posible en el rango:

$$0 < V < 2.405 \quad (19)$$

El modo fundamental no tiene condición de corte.

Para que una fibra unimodal tenga un diámetro de núcleo no muy pequeño se requiere reducir la diferencia relativa entre índice de refracción. Para un valor de  $V = 2.4$  a la longitud de onda de  $0.85 \mu\text{m}$ , parámetros típicos de la fibra son:

Radio del núcleo =  $4.0 \mu\text{m}$

índice de refracción del núcleo = 1.48 Diferencia relativa de índices = 0.003

Diferencia relativa de índices = 0.003

Una característica adicional de fibras ópticas unimodo es que para bajos valores de  $V$  el campo se extiende apreciablemente en el revestimiento. Para un valor de  $V$  de 1.4, aproximadamente la mitad de la potencia óptica se propaga en el revestimiento. Esto implica que el grosor del revestimiento debe ser adecuado (del orden de  $50 \mu\text{m}$ ).



## FIBRAS MULTIMODALES DE ÍNDICE GRADUAL.

Las fibras de índice gradual tienen un índice de refracción  $n(r)$  que decrece con el radio  $a$  desde un valor máximo  $n_1$  en el eje a un valor constante  $n_2$  en el revestimiento. Esta variación de índice se representa como:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 (1 - 2\Delta(r/a)^\alpha)^{1/2} & r < a \text{ (núcleo)} \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} = n_2 & r > a \text{ (revestimiento)} \end{cases}$$

donde  $\Delta$  es la diferencia de índice de refracción y es el parámetro de que da la característica de perfil de índice de refracción del núcleo fibra. En la Ec. (20),  $\alpha = \infty$ ,  $\alpha = 2$  y  $\alpha = 1$  significan un perfil de escalonado, parabólico y triangular respectivamente.

Los perfiles de índice gradual que mejores resultados presentan para propagación multimodal tienen un perfil de índice de refracción en el núcleo casi parabólico con  $\alpha \approx 2$ .

Una fibra multimodal con un perfil de índice parabólico se muestra en la Fig. 12. Los rayos meridionales siguen trayectorias curvas a través del núcleo de la fibra.

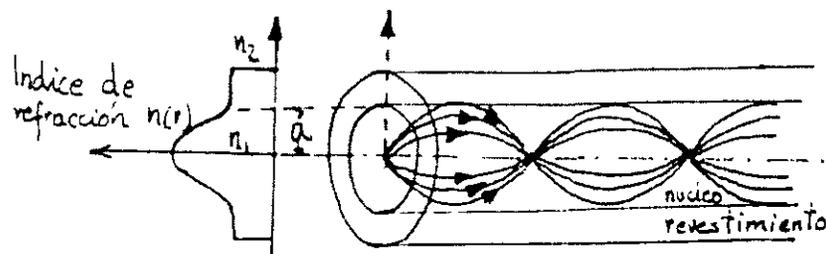
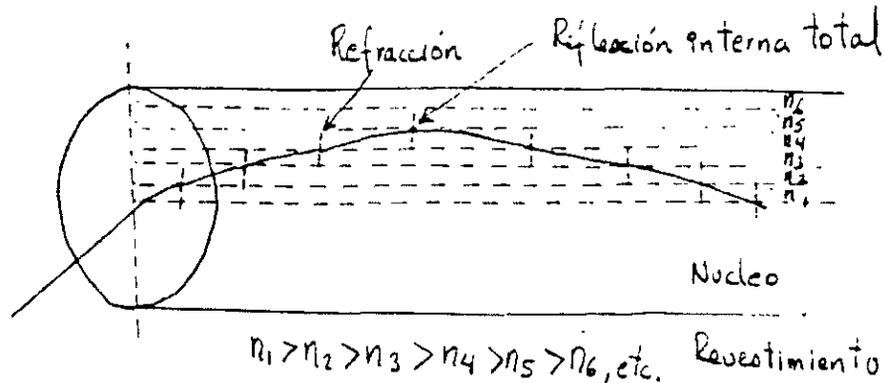


Fig. 12.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos en una fibra de índice gradual multimodal.

Usando los conceptos de óptica geométrica, la disminución gradual en el índice de refracción a partir del centro del núcleo crea muchas refracciones de los rayos y estos se comportan como si incidieran en un número alto de interfaces de alto a bajo índice. El mecanismo se ilustra en la Fig. 13 donde un rayo se muestra gradualmente curvado, con un ángulo de incidencia siempre creciente hasta que se cumplen las condiciones de reflexión interna total, y el rayo viaja nuevamente hacia el eje del núcleo siendo refractado continuamente.



**Figura 13.- Diagrama que muestra la refracción en las diversas interfaces de alto a bajo índice en una fibra. de índice gradual lo que da una trayectoria curva del rayo.**

Las fibras con índice gradual exhiben mucho menos dispersión intermodal que las fibras de índice escalonado debido a que muchos modos diferentes son excitados en una fibra de índice gradual, las diferentes velocidades de propagación de los modos tienden a normalizarse por el gradiente de índice. Los rayos casi axiales se transmiten a través e una región de alto índice e refracción y por lo tanto viajan a una velocidad más baja que los rayos más extremos. Esto compensa las trayectorias mas cortas y reduce la dispersión en la fibra.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**CABLES DE FIBRA ÓPTICA,  
MODIFICACIONES E INSTALACIONES**

**CONFERENCISTA  
M. en C. RAÚL UGALDE M.  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



## CABLES DE FIBRA OPTICA

### Introducción

Los sistemas de comunicación por fibras ópticas ofrecen grandes ventajas debido a su gran ligereza, alta capacidad de transmisión e inmunidad a la interferencia electromagnética, lo que permite operar bajo condiciones en las cuales los cables metálicos presentan grandes problemas de ruido, diafonía y saturación de los ductos disponibles para las líneas.

La tecnología de fibras ópticas maneja actualmente en forma comercial fibras multimodales de índice gradual que trabajan con una longitud de onda de emisión de  $0.85 \mu\text{m}$ , presentando una atenuación de 2 a 3 dB/Km, aunque su tendencia es operar con fibras multimodales (de índice gradual) y monomodales (de índice escalonado) que operen en el rango de 1.3 a  $1.6 \mu\text{m}$ ; en este caso para las fibras multimodales a  $1.3 \mu\text{m}$  se tiene una atenuación de 0.7 a 1.2 dB/Km con un ancho de banda de 800 a 1300 MHz .Km. Para las fibras monomodo se maneja un rango de atenuación de 0.5 a 0.8 dB/Km, y de 0.2 a 0.3 dB/Km, para las longitudes de onda de 1.3 y  $1.55 \mu\text{m}$  respectivamente, teniendo un ancho de banda de varias decenas de GHz. Km.

Dependiendo de la longitud de onda de operación también se definen los espacios entre repetidores ópticos; así, para  $0.85 \mu\text{m}$  se admite una separación máxima entre 10 y 12 Km., mientras que para  $1.3 \mu\text{m}$  se pueden lograr distancias de 50 Km. y para  $1.55 \mu\text{m}$  hasta de 100 Km. (1).

Es por ello que resulta importante considerar que las características de la fibra óptica pueden degradarse por las condiciones de fabricación misma (diámetro de núcleo y revestimiento, concentricidades de ambas regiones, índices de refracción de los mismos, etc), por las condiciones de operación durante la instalación (sobre-tensiones y compresiones) y por las condiciones ambientales (temperatura, viento, y humedad principalmente) de la zona de instalación. Para esto se requiere conocer cuales son los parámetros que se ven mayormente influidos por dichas condiciones, y de que manera afectan la calidad de la transmisión del sistema en general.

Para lograr este objetivo es necesario estudiar algunos parámetros de la fibra óptica como son la sensibilidad a las curvaturas y micro curvaturas, sus características de envejecimiento, y su resistencia mecánica, ya que ello permitirá establecer un criterio de diseño en cuanto al tipo de estructuras de cable óptico aplicables de acuerdo a las condiciones de transmisión por fibras requeridas.



## CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO DEL CABLE ÓPTICO

Debido a las características del material, las fuerzas radiales y axiales, además de los momentos flexionantes, producen en la fibra óptica una serie de fenómenos que se traducen en un aumento de la atenuación de la señal óptica, y consecuentemente en una disminución de la calidad de transmisión en ella misma.

Por otro lado, cuando una fibra se somete a condiciones de tensión, y en presencia de un ambiente húmedo, se genera un proceso de envejecimiento que da como resultado la ruptura de la fibra óptica a un cierto plazo (fatiga estática).

Es por esto que el diseño del cable debe procurar aislar a las fibras ópticas de esfuerzos innecesarios a fin de evitar al máximo las deformaciones en ellas. A continuación se analizan las propiedades ópticas y mecánicas de las fibras ópticas que influyen en la atenuación y su tiempo de vida.

### a) Propiedades ópticas de las fibras

Existen dos fenómenos interrelacionados con las curvaturas del eje de la fibra que producen perturbaciones en la propagación de la potencia óptica, y con ello, trayectorias de radiación a su paso por dichos defectos: Ellos son el radio de curvatura o curvatura continua, y las micro curvaturas o micro desviaciones.

En el caso del radio de curvatura, este se presenta como consecuencia, de esfuerzos de compresión sobre la fibra óptica, produciendo un decrecimiento exponencial de la potencia óptica de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \frac{Ae^{(-\beta R)}}{R} \quad (1)$$

Donde,

A = constante que depende del tipo de fibra óptica empleada

$P_1$  = potencia óptica

$\beta$  = constante de propagación del modo

El valor máximo del radio de curvatura oscila entre 50 y 60 mm. Por su parte, las micro curvaturas se deben a esfuerzos de elongación cuando la fibra se encuentra apoyada sobre una superficie rugosa; esto genera un acoplamiento de potencia entre los modos guiados a



modos de radiación, produciendo una cierta pérdida en función de la distancia. Para una fibra óptica de índice gradual, se debe trabajar con un rango menor a 100 defectos por metro, de manera que las pérdidas no afecten al sistema de comunicación.

De esta forma, el eje óptico de la fibra sigue una curva periódica cuyo radio de micro curvatura depende de la presión con la que la fibra óptica se apoye en los defectos, aumentando las pérdidas de una manera exponencial con el radio de micro curvatura ( $R_m$ ); en la figura 5.-1 se muestra el comportamiento de la fibra óptica ante este fenómeno.

Las micro curvaturas se pueden analizar a partir de dos ecuaciones; una basada en los momentos aplicados a la fibra sobre la superficie, que producen la variación de  $R_m$  en el eje óptico, expresada como:

$$R_m = \frac{12ET}{M_p \Delta^2} \quad (2)$$

siendo,

$R_m$  = radio de microcurvatura

$E$  = módulo de elasticidad de la fibra

$I$  = momento de inercia de la fibra

$M_p$  = momento con el cual la fibra se apoya en la superficie

$\Delta$  = diferencia relativa de los índices de refracción

En la segunda fórmula se expresa la relación del microcurvatura con las pérdidas a lo largo de la potencia óptica:

$$\frac{\Delta P_1}{P_1} = \exp \left[ \left( - \frac{8.18a}{\pi^2 \Delta^{3/2}} \right) R_m^2 \right] \quad (3)$$

donde,

$a$  = radio de la fibra óptica

Es importante mencionar que el rango de variación de  $R_m$  es bastante amplio, ya que puede ir de 4 a 30 mm, lo cual puede llegar a producir atenuaciones considerables de la señal óptica.

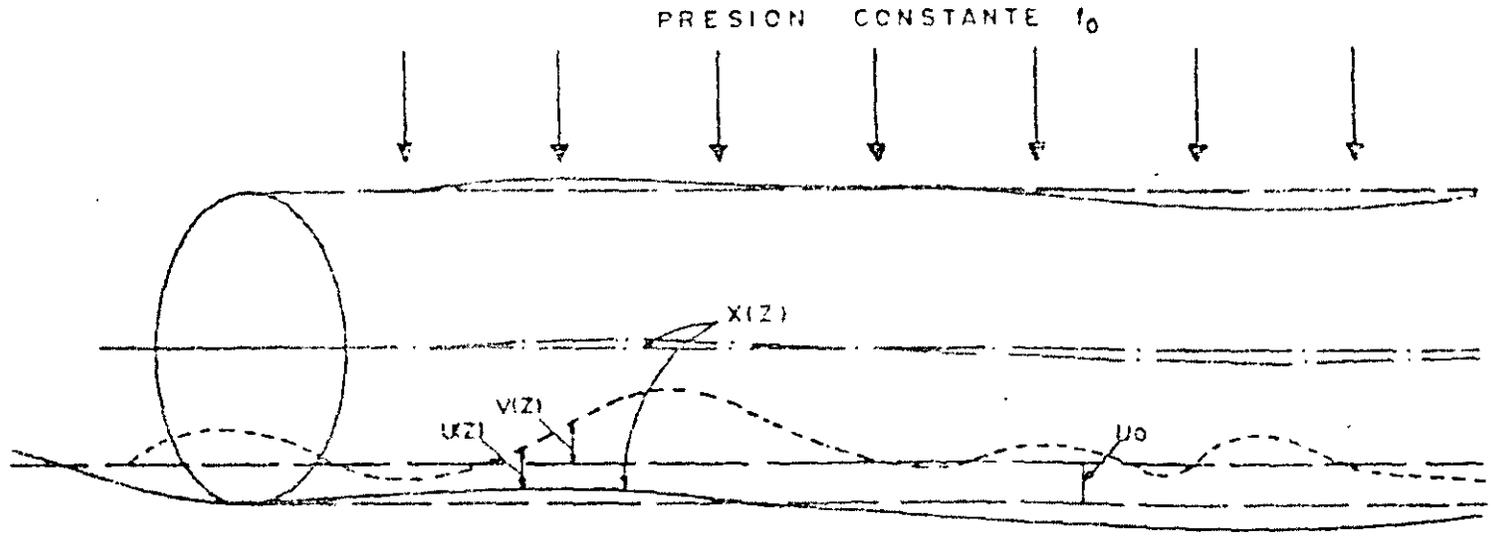


FIGURA 5.-1.- FIBRA PRESIONADA CONTRA  
UNA SUPERFICIE RUGOSA



Por esta razón; se ha buscado la forma de minimizar la influencia de dichas microcurvatura sobre la fibra, y consecuentemente sobre la calidad del cable óptico, a través de la modificación de algunos parámetros de la fibra o del cable como son:

- Incremento del diámetro de la cubierta de la fibra, con el fin de aumentar su capacidad para soportar mayores tensiones antes de que aparezcan las microcurvaturas.
- Disminución del diámetro del núcleo de la fibra, para reducir el coeficiente de atenuación.
- Eliminación de la tensión T de la fibra en el cable a través de un diseño adecuado de la estructura del cable óptico.

De todas ellas, esta última solución es la que ha dado mejores resultados.

En resumen, se puede decir que ambos fenómenos, aunque completamente distintos, presentan una dependencia exponencial de la pérdida en función de un determinado radio de curvatura; en la gráfica de la figura 5.-2 se observan los niveles de atenuación producidos por los radios de curvatura descritos.

#### b) Propiedades mecánicas de las fibras

Las fibras ópticas sometidas a esfuerzos de tensión bajo condiciones ambientales difíciles de temperatura y humedad se ven expuestas a un proceso de envejecimiento que da como resultados la ruptura de la fibra en un cierto tiempo. Dicho proceso sufre una aceleración debido a la existencia de las llamadas microfracturas, que se encuentran distribuidas aleatoriamente a lo largo de la fibra, tanto en forma superficial como interna; así los esfuerzos de tensión se concentran en las microfracturas, propagándose cuando el esfuerzo adquiere valores cercanos al límite de ruptura del material. Esto último produce que la resistencia mecánica de las fibras ópticas se reduzca considerablemente; como ejemplo, se ha comprobado que para provocar la ruptura con una elongación del 1% (correspondiente a 10 N aproximadamente), se requieren . fracturas no mayores a  $1 \mu\text{m}$  de profundidad; en la fig. 5.-3 se muestra la presencia de dichas microfracturas en la fibra óptica.

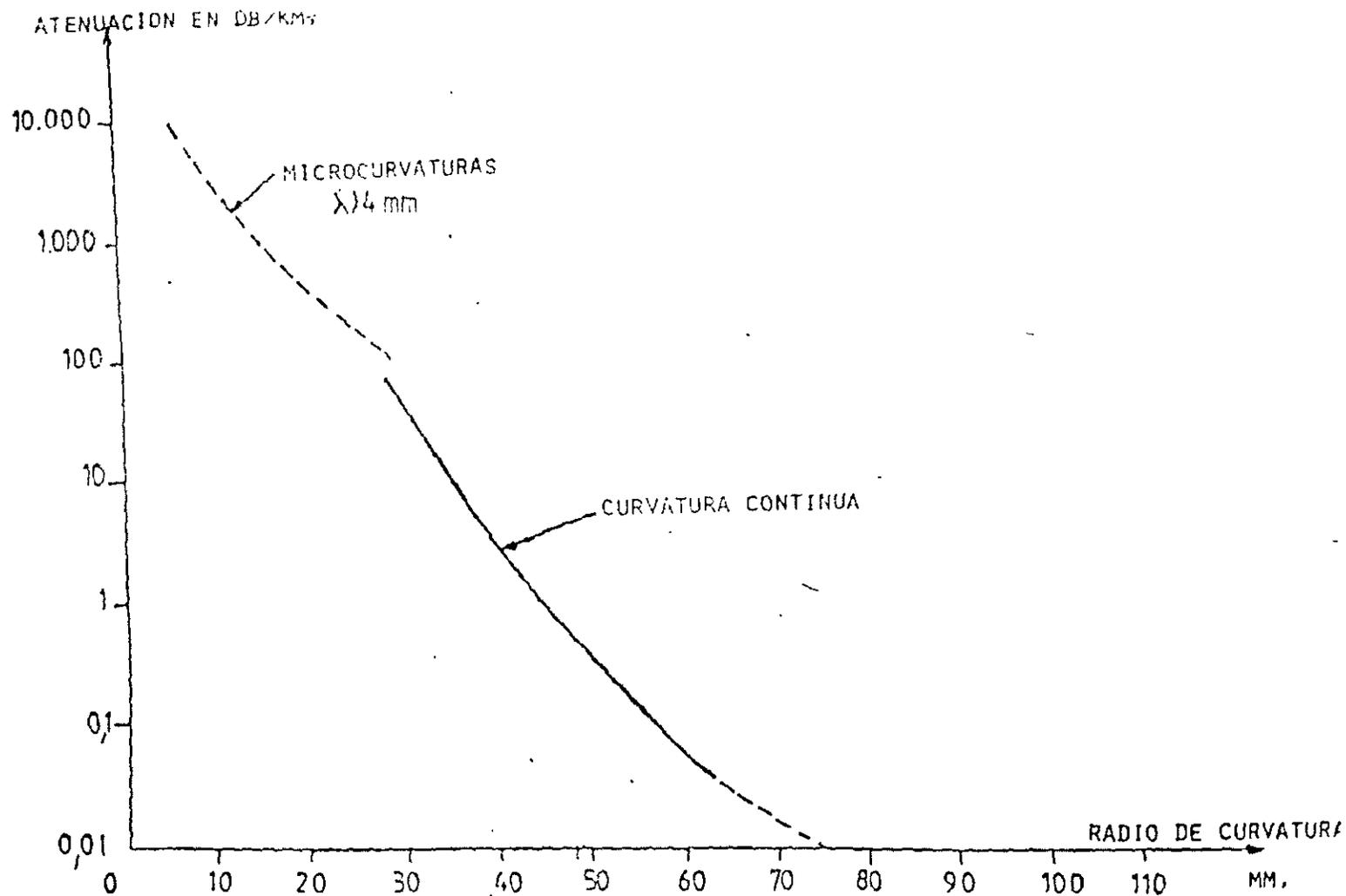


FIGURA 5.-2.- ATENUACION EN EXCESO EN FUNCION DEL RADIO DE CURVATURA



INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES

LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES DE MEXICO



Gracias al mejoramiento de los procedimientos de fabricación de las fibras ópticas se ha podido obtener una distribución homogénea de los defectos superficiales conocidos como distribución de Weibull, que permite determinar la probabilidad de ruptura en función del esfuerzo aplicado; esta se expresa por la siguiente ecuación:

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp \left[ -L \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

donde,

$m$  = pendiente de la gráfica de distribución de defectos

$\sigma_0$  = tensión inicial sobre la fibra óptica

$\sigma$  = tensión de ruptura

$L$  = longitud de la fibra óptica

Para que estas pruebas de caracterización de las fibras sean significativas se necesita un análisis estadístico con un gran número de muestras de fibras ópticas o con longitudes de fibra equivalentes a las que serán empleadas en la práctica. La fig 5. -4 muestra la relación entre la distribución de Weibull y la distribución real de la resistencia a la tensión en una serie de muestras de fibra óptica; en ella se puede apreciar como la resistencia a la tensión disminuye conforme aumenta la longitud de, fibra bajo prueba, a través de la variación de la pendiente de fractura ( $m$ ) en forma positiva.

Otro factor importante que influye en el fenómeno de envejecimiento es el conocido como fatiga estática, el cual es una consecuencia de la presencia de microfracturas en la fibra, de manera que ante variaciones de temperatura y humedad, y combinando ciertos valores de tensión aplicada al cable (tensión de trabajo) y resistencia inicial a la tensión de la fibra óptica, la fatiga estática producirá un rápido envejecimiento de la fibra con un período de vida de unos pocos días; es por esto que se debe tener sumo cuidado durante los procesos de fabricación e instalación, aprovisionando a la fibra de las protecciones plásticas y metálicas correspondientes, de forma que el tiempo de vida útil del cable resulte lo más grande posible, ante la influencia del medio ambiente.

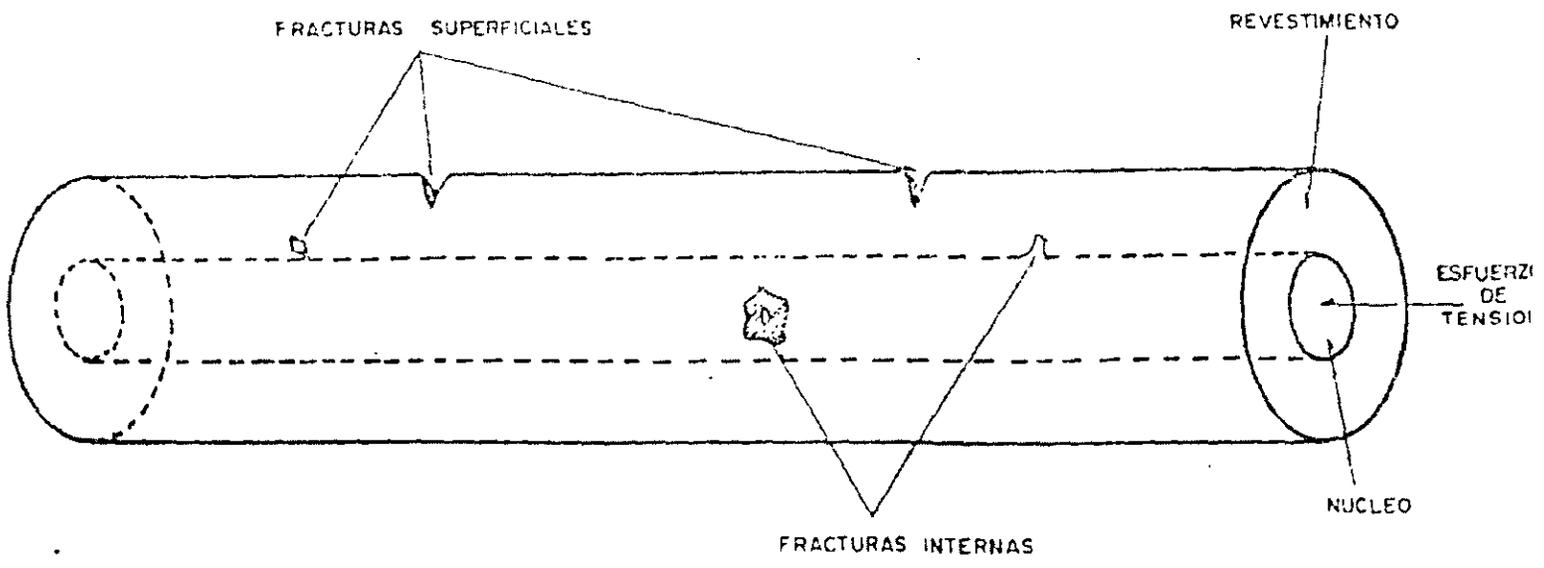


FIGURA 5.-3.- MICROFRACTURAS EN LA FIBRA OPTICA

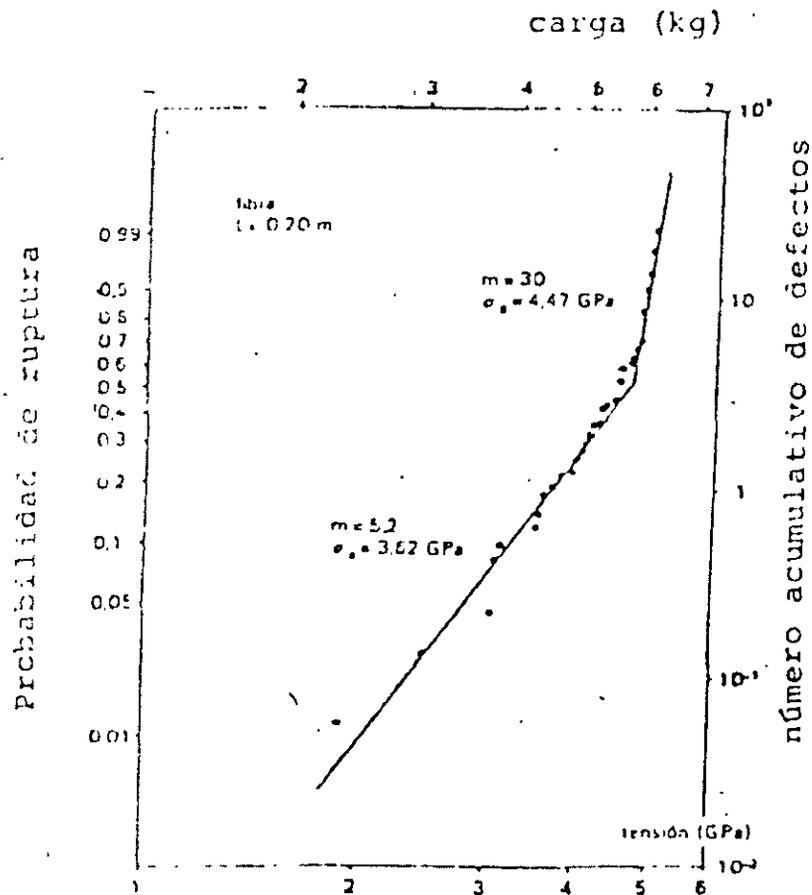


FIGURA 5.-4 PROBABILIDAD DE RUPTURA EN FUNCION DEL ESFUERZO DE TENSION

## ESTRUCTURA DEL CABLE OPTICO

En la actualidad existen una gran variedad de estructuras de cable óptico fabricadas y distribuidas dentro del mercado mundial, todas ellas tendientes a satisfacer los requerimientos de sus aplicaciones, y principalmente buscando una reducción de las pérdidas ocasionadas por curvaturas o microcurvaturas en la fibra óptica, debido a las condiciones de operación de la misma.

Para ello se deben analizar los problemas de compatibilidad de coeficientes de expansión térmica y módulos de elasticidad de los materiales que componen al cable óptico, su resistencia mecánica (resistencia a la tracción  $R_r$ , y compresión  $R_e$ ) yel tratamiento de los materiales plásticos (extrusión, maquinado, etc.)



Las estructuras de los cables pueden ser clasificadas en grupos, dependiendo de la forma en que afectan al comportamiento de la fibra óptica:

- Estructuras densas, en las que la fibra se encuentra inmersa en el material plástico, por lo que su comportamiento térmico y mecánico afecta la calidad de la transmisión.
- Estructuras libres, caracterizadas por un soporte alveolar que permite a las fibras ópticas evitar los problemas de curvaturas y microcurvaturas, por medio de un margen de elongación sobre las mismas.

## Estructuras Densas

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

### a) Estructuras densas trenzadas

La estructura emplea la extrusión de uno o más recubrimientos plásticos como refuerzos y protección de la fibra óptica antes de su ensamblado por grupos o por capas. El uso de varias capas de recubrimiento disminuye las pérdidas por microcurvaturas generadas por la extrusión y el ensamblado, además de las variaciones de la atenuación con la temperatura; (3) en la figura 5.-5 se observa un cable de estructura densa monofibra de tres capas, en donde se aprecia un recubrimiento primario fino, sobre el que se aplica una capa espesa (0.45 mm de diámetro) de resina de silicón que posee un bajo módulo de elasticidad, y mediante extrusión, se le recubre con nylon 12 para darle una mejor consistencia a la estructura. Dicha protección también puede ser a base de poliésteres elastoméricos, o en general cualquier material termoplástico con un alto módulo de elasticidad, y un bajo coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ), a fin de prevenir las pérdidas por micro dobleces causadas por la variación en la estabilidad térmica del material. En este caso, el silicón permite absorber las deformaciones de la fibra óptica producidas por la tensión del trenzado, las inhomogeneidades de los parámetros geométricos y de materiales en la capa extruida, la variación en el control de la fabricación del cable óptico (rugosidades, etc.) y los efectos térmicos.

Las características de este cable le permiten un tamaño reducido y gran flexibilidad, además de lograr una continuidad de la transmisión en el caso de alguna fisura en la fibra, sin embargo los materiales empleados son muy susceptibles a la absorción de iones  $\text{OH}^-$  y a la compresión lateral, por lo que su manejo debe ser delicado.

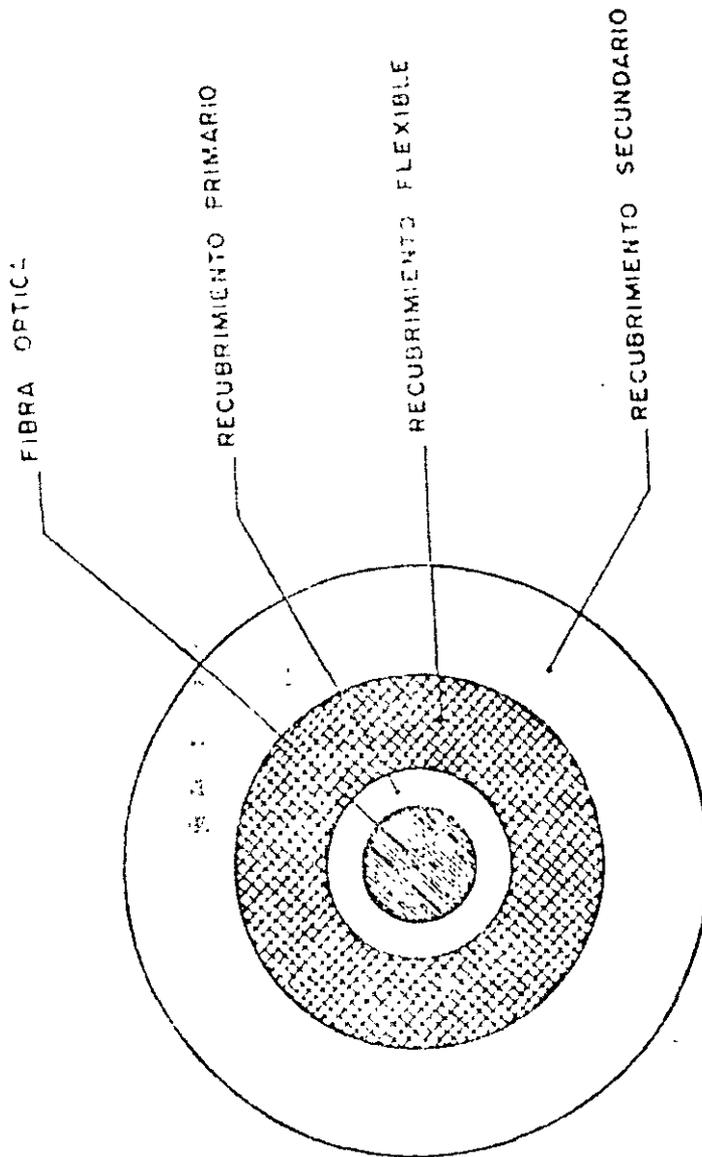


FIGURA 5.-5.- FIBRA OPTICA DE TRES CAPAS

#### b) Estructuras de cintas densas

Este tipo de estructuras maneja un gran número de fibras ópticas por cable, las cuales se reúnen en una matriz enrollada en forma de espiral a fin de que el cable óptico soporte mejor los radios de curvatura a los que se someta; sin embargo es importante que se tenga un control de la operación de torsión de la espiral de la matriz, ya que ello implica esfuerzos mecánicos variables sobre la fibra de acuerdo a su posición en la matriz. La fig. 5.-6 muestra una estructura de 144 fibras ópticas con un recubrimiento primario de 0.25 mm de diámetro;



cada cinta posee 12 fibras constituyendo una matriz de  $25 \text{ mm}^2$ . Dicha matriz va cubierta exteriormente con una capa de polietileno de alta densidad (HDPE) de 12 mm. de diámetro. Este tipo de estructura se emplea tanto para fibras multimodo como unimodo. En este último caso se han probado con una atenuación promedio de 0.38 dB/Km a 1310 nm y 0.23 dB/Km a una longitud de onda de 1550 nm.

Es obvio que este tipo de materiales repercutirán en el comportamiento térmico y mecánico de las fibras ópticas, y consecuentemente en las atenuaciones adicionales que se presenten durante el tendido.

### Estructuras Libres

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

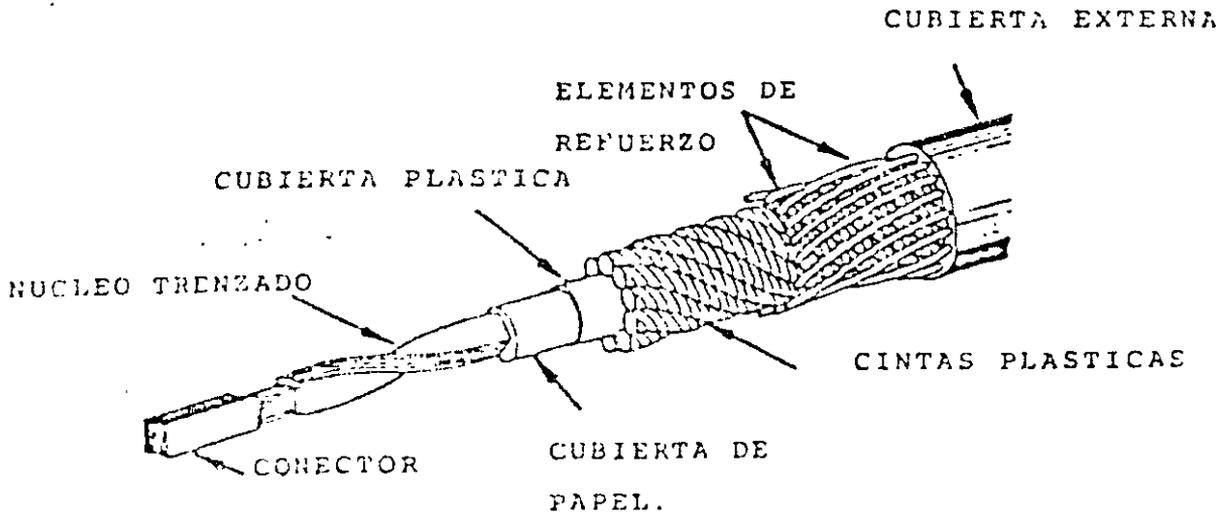


FIG. 5.-6 Cable Óptico que contiene 144 fibras

#### a) Estructura de fibras libres en tubos

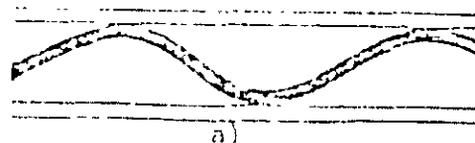
El principio básico de estas estructuras es permitir un margen de elongación a la fibra óptica contenida en un tubo de plástico extruido. Cada fibra contenida en dichos tubos presenta una ventana de elongación/contracción en la que la fibra óptica permanece libre de esfuerzos; esta ventana se determina por el espacio interno de la fibra óptica en el tubo ( $w$ ), y el período de la hélice ( $\mu$ ) de la fibra dentro del tubo; en este caso, el margen de elongación puede llegar hasta 0.1 %; si se aumenta la carga de esfuerzos sobre el cable óptico, se disminuye el margen de elongación ( $\epsilon^s$ ) de la fibra en el cual ésta permanece libre de esfuerzos, y se ajusta a una posición casi recta (ver fig. 5.-7). Cuando la tensión sobrepasa el límite del margen de elongación, la fibra óptica se encuentra sometida a un estado de esfuerzos de tensión, por lo que se empiezan a generar pérdidas por microcurvaturas en los



puntos en que la fibra se apoya en la pared interna del tubo. Esta situación produce un incremento en la atenuación y de los efectos de fatiga estática.

Es por ello, que para prevenir cambios irreversibles de la atenuación, o la ruptura de la fibra óptica, el cable debe mantenerse en un estado de esfuerzo de tensión por períodos cortos de tiempo, lo que implica necesariamente una reducción al máximo del tiempo de tendido (ver fig 5.-8).

De manera contraria, también se puede presentar un incremento en el margen de elongación ( $\epsilon^s$ ) a causa del encogimiento de los materiales plásticos del tubo durante enfriamiento. La atenuación permanece fija hasta que los efectos del enfriamiento producen un acortamiento de la hélice de la fibra, generando las pérdidas por doblamientos periódicos. Este efecto produce además una disminución de la ventana hacia la contracción.



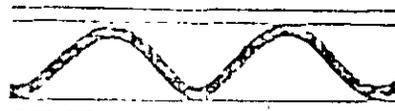
a)

Fibra óptica en el tubo después del cableado



b)

Decremento de la longitud en exceso por esfuerzos sobre el tubo durante la tensión.



c)

Incremento de la longitud en exceso por encogimiento del tubo durante enfriamiento

Fig. 5.-7 Fibras Ópticas en estructuras de tubos libres.

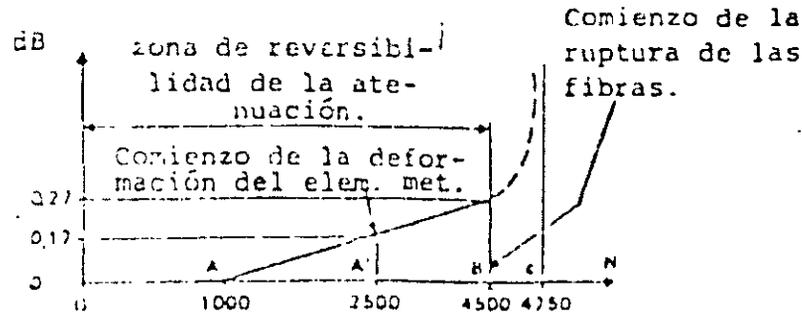


Fig. 5.-8 Comportamiento mecánico de una estructura libre.

Cuando se trata de estructuras libres trenzadas, la ventana de elongación/contracción se determina por medio del espacio libre de la fibra óptica en el tubo ( $w$ ), la longitud de la hélice del trenzado ( $L$ ), y el diámetro del círculo ( $D$ ) (ver fig 5.-9).

El margen de elongación inducido por el trenzado es mayor que en caso de estructuras libres sin trenzar (de 0.3 a 0.8%). De esta forma, cuando el cable trenzado es sometido a tensión, la fibra óptica se mueve lateralmente hacia el centro del núcleo del cable; mientras permanece en un cierto rango, la fibra óptica no sufre esfuerzos hasta que toca la pared interna dentro del tubo que está en contacto con el miembro central de refuerzo.

Esta estructura de tubos puede ser seca o rellena; los enlaces instalados han demostrado que la mayoría de las aplicaciones operan mejor rellenas, ya que además de actuar como una barrera contra la migración del agua al aplicarse tanto dentro como fuera de los tubos, dicha gelatina le sirve como amortiguador a la fibra, a fin de evitar el rozamiento de la misma con las paredes del tubo que la contiene.

#### b) Estructura de cintas con fibras libres

La estructura consta de una cinta con 5 alvéolos en forma hexagonal, con un círculo inscrito de 450  $\mu\text{m}$  de diámetro.

El cable óptico se construye termosellando dos bandas de aluminio cubiertas en sus caras opuestas por una película de polietileno; se acoplan en grupos de 10 y se envuelven con dos cintas protectoras, un refuerzo de material plástico y enrolladas en una espiral. Dicha estructura tiene ventajas sobre la afectibilidad de los esfuerzos mecánicos,



comparativamente con las estructuras de cintas densas (ver fig. 5.-10)

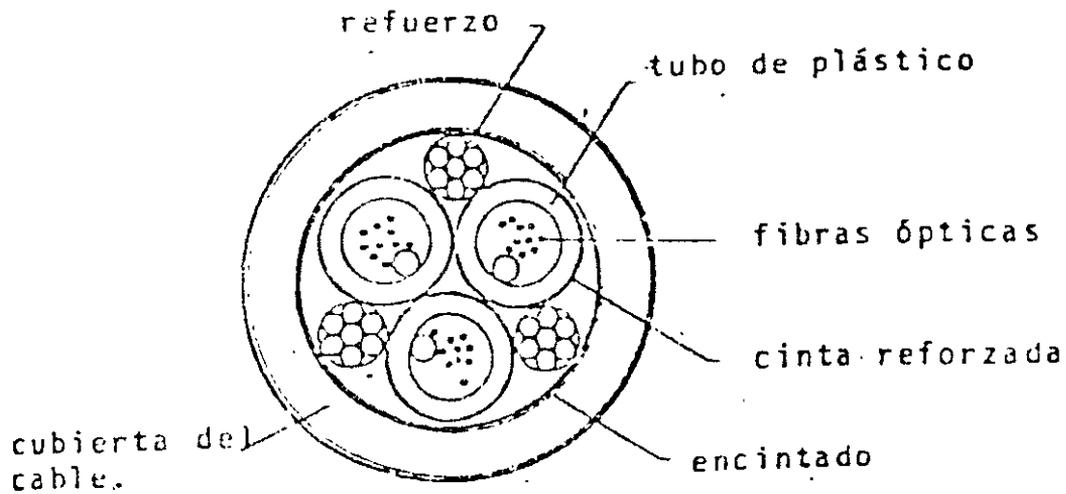
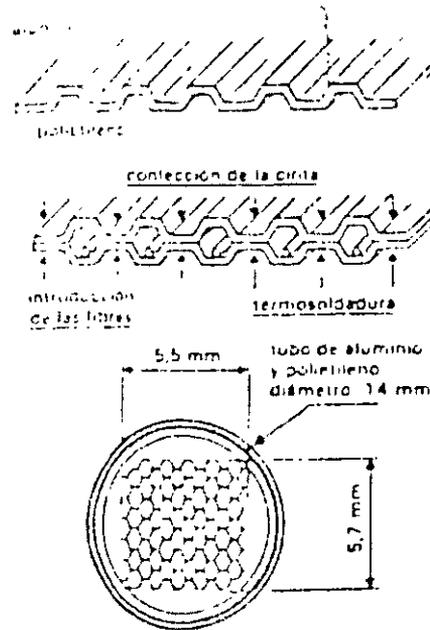


Fig. 5.9 Estructura de fibras libres trenzadas.





### c) Estructura cilíndrica ranurada

El elemento de cable se forma por un cilindro ranurado en "V" (ver fig. 5.-11) de diámetro (D) en el que se alojan libremente las fibras ópticas de diámetro exterior (de) (recubrimiento primario) con lo que se les permite un margen de elongación; las ranuras se disponen en espiral con una profundidad (h), y un paso helicoidal (P) continuo o alternado, lo que permite, por una parte, mayor holgura a las fibras ópticas liberándolas de esfuerzos mecánicos dentro de un cierto rango de elongación/contracción, y por otro, debido a que el cable puede someterse a condiciones de elongación prolongadas, se requiere agregar una longitud adicional de fibra óptica bucleada en las ranuras a fin de aumentar el rango de trabajo. El cilindro ranurado se refuerza por un miembro central de diámetro (Dp), logrando un mejor comportamiento térmico y mecánico del cable. (Rr, Re, porcentaje de elongación A%, coeficiente de expansión térmica  $\alpha$ ).

Los parámetros más importantes de esta estructura son:

1) La diferencia de longitud entre el paso de la fibra óptica en el fondo de la ranura, con respecto al borde de la ranura ( $\epsilon_c$ ):

$$\epsilon_c = \frac{2\pi^2(D-h)(h-de)}{P^2 + \pi^2(D-de)^2} \quad (5.-5)$$

2) El radio de curvatura continuo (Rc), determinado por la hélice del cilindro:

$$R_c = \frac{(D-de)}{2} \left( 1 + \frac{P^2}{\pi^2(D-de)^2} \right) \quad (5.-6)$$

3) Si al radio de curvatura continuo (Rc) radio periódico de la hélice ( $\mu$ ) cuando, se tiene holgura de la fibra en la cavidad, se establece el margen de elongación ( $\epsilon_s$ ).

$$\epsilon_s = \frac{h-de}{8R_s} \quad (5.-7)$$

Donde  $R_s$  es el radio mínimo de curvatura autorizado.

4) El margen de elongación teórica se expresa como:



$$\epsilon t = \frac{\epsilon c}{2} + \epsilon s \quad (5-8)$$

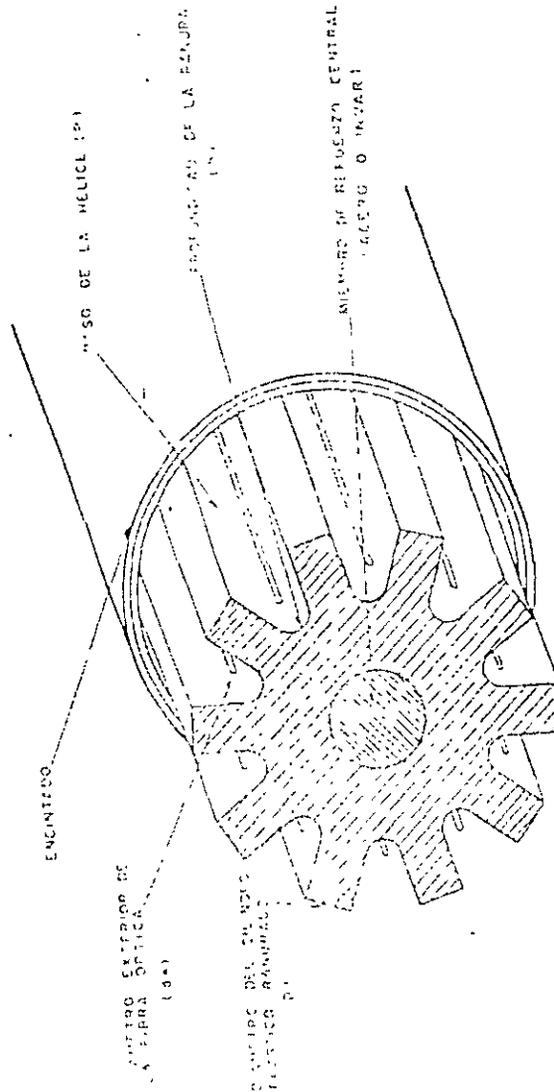


FIG. 5.-1] ESTRUCTURA CILINDRICA RANURADA EN "V"

5) La combinación de la curvatura continua (R<sub>c</sub>) y la curvatura periódica (μ), induce un esfuerzo de curvatura estático (σ<sub>a</sub>) que debe exceder a un valor (σ<sub>al</sub>), el cual se determina por:



$$\sigma_a = Edf \left[ \frac{1}{h - de} \left( \frac{1}{\frac{1 + P^2}{\pi^2 (D - de)^2}} \right) + \frac{4\epsilon s}{h - de} \right] \quad (5-9)$$

Siendo Edf el módulo de elasticidad de la fibra óptica.

De esto se concluye que el paso de la hélice (P), su profundidad (h) y las curvaturas debidas al cable (Rs), son factores importantes en el cálculo del margen de elongación de la fibra, y de la calidad de la transmisión.

En lo que se refiere a la elongación del cable óptico, la figura 5.-12 muestra el rango de operación o ventana de elongación/contracción de dos cables ópticos (uno con P = 100 mm y otro con P = 320 mm, con una h = 0.67mm.), tanto teórico como experimental.

La diferencia entre ambas curvas se debe por un lado, a la inhomogeneidad de la deformación por compresión de la fibra óptica (pérdidas por curvaturas) establecidas en la parte superior de la ranura, y por otro, a las pérdidas por microcurvaturas, considerando una capa delgada de recubrimiento y una distribución de defectos con período Δ, y que aparecen en la parte inferior de la ranura.

En cuanto a las características de los materiales utilizados, se ha estimado el coeficiente de expansión térmica de la fibra óptica (αc) con un valor de  $5 \times 10^{-7}$  y para el cilindro ranurado de  $1 \times 10^{-4}$  lo que obliga a considerar materiales de refuerzo que posean un menor coeficiente de dilatación térmica, y un módulo de elasticidad mayor, de forma que se obtenga un cable óptico con un rango de temperatura más amplio. Debido a ello, se ha diseñado el cilindro ranurado con polietileno de baja densidad (LDPE), empleando un refuerzo central de INVAR (Ni 36%, Fe 64%), KEVLAR o acero.

El comportamiento térmico de la estructura presenta un rango estable de atenuación bastante grande; para un miembro de refuerzo de acero se tiene un rango de -15°C a 50°C, y para el INVAR, un rango de -40°C a 80°C.

La fig. 5.-13 indica las curvaturas de tensión para miembros de refuerzo de KEVLAR, acero e INVAR.

Por su parte, la cubierta del cable óptico permite disminuir los esfuerzos de tensión y compresión que actúan sobre los módulos de fibras ópticas, y ofrecen una adecuada protección contra la humedad; dichas cubiertas pueden ser de aluminio + polietileno de alta densidad (HDPE), acero + polietileno, aluminio corrugado + polietileno, compuestos



reforzados de plástico y vidrio (FRP), entre otros; de ellos, la combinación más usual resulta de aluminio + HDPE.

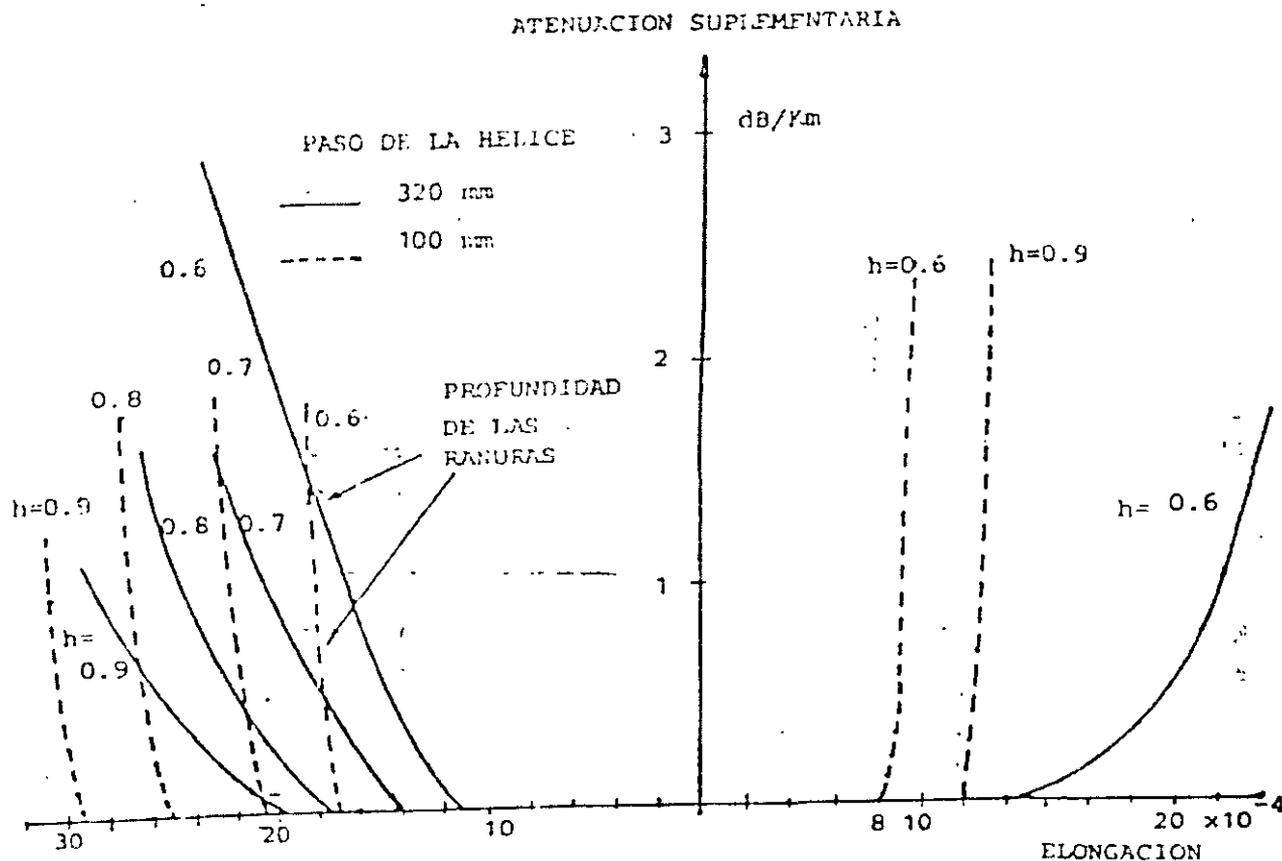


Fig. 5.-12 Atenuación del cable en función de la elongación y compresión para diferentes valores de  $h$ .

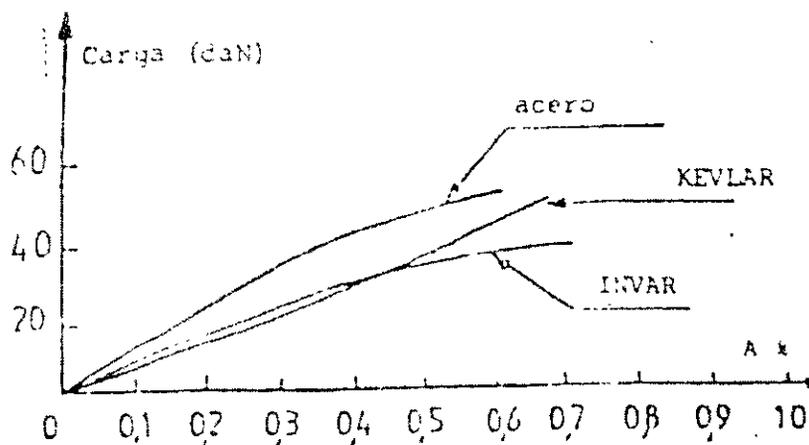


Fig. 5.-13 Prueba de tensión para el elemento de refuerzo de la estructura cilíndrica ranurada.

Las estructuras antes mencionadas son las más comunes en el mercado mundial, presentando algunas, más ventajas que otras, por lo que es importante considerar su afectabilidad en la calidad de la transmisión, especialmente en el caso de estructuras sometidas a condiciones críticas de esfuerzo como es el caso del cable aéreo y submarino; dichas consideraciones se analizan a continuación.

## CALIDAD DEL CABLE OPTICO

La calidad del cable óptico depende de diversos factores como son el tipo de materiales utilizados, el número de etapas, y su proceso de fabricación; por ello, la calidad del cable puede evaluarse en función de su comportamiento óptico, térmico y mecánico.

### a) Calidad de transmisión óptica.

Para la evaluación del cable bajo transmisión se compara la atenuación de la fibra óptica antes y después del proceso de cableado en dicho análisis se pueden tener dos casos: la variación en la atenuación para un cable de estructura densa y para un cable de estructuras libres. En el primero, los resultados indican que existe un incremento en la atenuación con un valor promedio de 0.1 dB; en cambio, para un cable con estructura cilíndrica ranurada la atenuación mejora en 0.1 dB para la longitud de onda de 1.3  $\mu\text{m}$ , como se indica en la tabla 5.-14, y se debe principalmente a que la fibra está menos sujeta a tensión.



VALOR MEDIO EN dB/Km	0.85 $\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	1.55 $\mu\text{m}$
ANTES DE LA FABRICACION	2.9 dB/Km	0.6 dB/Km	0.4 dB/Km
DESPUES DE LA FABRICACION	2.5 dB/Km	0.5 dB/Km	0.3 dB/Km

Fig. 5.-14 Atenuación en un cable cilíndrico ranurado

#### b) Calidad del comportamiento térmico

El comportamiento térmico del cable óptico está en función del proceso de fabricación y de los materiales empleados, ya que cualquier diferencia en los coeficientes de expansión que no sea compensada debidamente producirá pérdidas por curvaturas creadas cuando el cable se contrae o expande después de cierto límite.

La fig. 5.-15 muestra los resultados experimentales para la variación de la atenuación de la señal cuando se utilizan diferentes tipos de cubierta. Para un cable de fibras libres, la estabilidad térmica está dada por holgura en el diseño del cable, de manera que los parámetros geométricos del mismo tienen un papel muy importante; en forma comercial es posible obtener cables con un rango de operación de  $-60^{\circ}$  a  $+60^{\circ}$  C.

#### c) Calidad del comportamiento mecánico

De acuerdo a los estudios experimentales realizados, las fibras ópticas no deben sufrir una deformación mayor al 0.20%, para lograr un tiempo de vida mayor a 30 años. En algunas aplicaciones, dicho valor de elongación se sobrepasa por lo que se recurre a diseños especiales de cable, fundamentados en el tipo de material usado como elemento de refuerzo central y de recubrimiento, tanto en los grupos de cables ópticos, como en los construidos de manera independiente. Solamente con un adecuado control de las diferentes etapas de fabricación del cable se podrá obtener una reducción del número de fallas durante la instalación y puesta en operación del mismo.

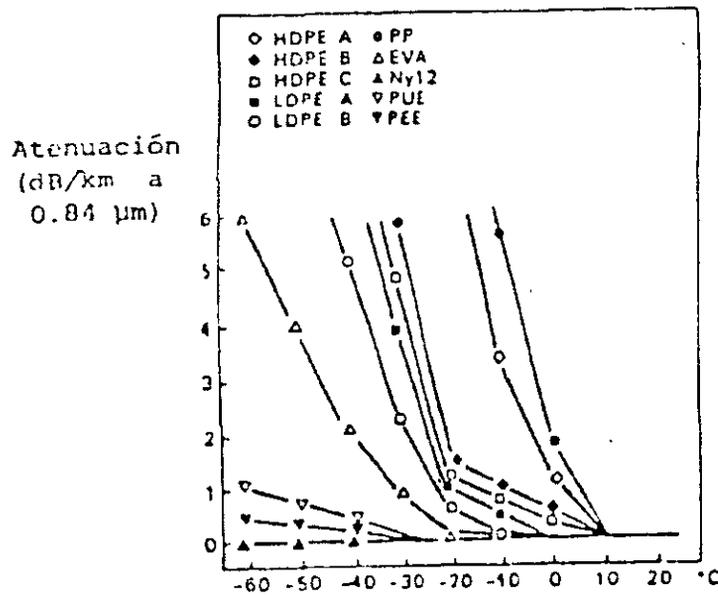


Fig. 5.-15 Atenuación adicional de las fibras de tres capas a bajas temperaturas.

## APLICACIONES DEL CABLE OPTICO

Las aplicaciones del cable de fibra óptica en los sistemas de comunicación se dividen en tres grandes grupos: instalación subterránea o en ductos, instalación aérea, e instalación submarina.

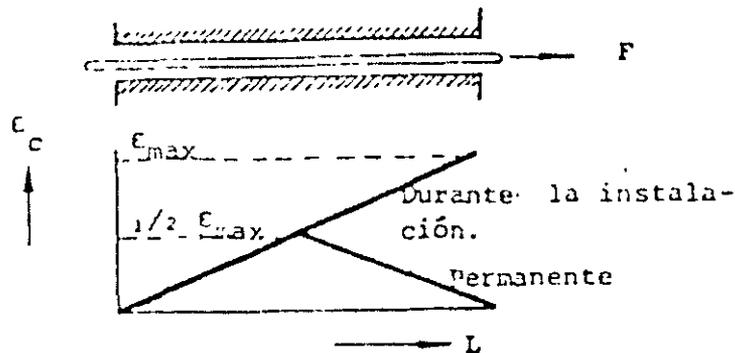
Como cada una de ellas presenta características especiales, éstas serán analizadas por separado.

### a) Instalación subterránea

Durante la instalación subterránea, el cable se ve sometido a dos tipos de procesos: la instalación misma, que implica ejercer tensiones relativamente altas durante periodos cortos, y la condición de servicio normal, en las que los esfuerzos, son menores y prolongados. En el caso de un tendido subterráneo, la elongación máxima esperada es de orden de 0.2 a 0.4% (ver fig. 5.-16);, esto demuestra que las condiciones de tensión mecánica no son muy estrictas, y que el diseño del cable óptico puede realizarse fácilmente.



Sin embargo, es importante mencionar que en casos en los que se cruce por áreas con alta inducción electromagnética, es recomendable o bien tomar las precauciones pertinentes para aterrizar adecuadamente el blindaje contra roedores, o sustituir dicha protección por un material de refuerzo dieléctrico a base de kevlar o fibra de vidrio con alguna resina, al igual que el elemento de refuerzo central.



Valores típicos:  $F_{max} = 1000 \text{ N}$   
 $\epsilon_{max} = 0.2 \dots 0.4 \%$

Fig. 5.-16 Deformación permanente para cables en ductos.

## b) Instalación Aérea

En algunas ocasiones es más conveniente un tendido aéreo, ya que se cuenta con los postes o las torres de líneas ya existentes, por lo que aprovechando su bajo peso, su maniobrabilidad y sus características dieléctricas se logra una reducción de los costos de instalación; sin embargo, esto requiere que los cables ópticos puedan soportar elongaciones del orden del 1%, por lo que las fibras ópticas deben protegerse adecuadamente.

Cuando los claros poseen una longitud menor a 100 metros, los problemas para el diseño de la estructura se enfocan a los esfuerzos de tensión sobre el cable producidos por el peso del mismo, la presión del viento, la carga de hielo y la variación de temperatura; para esta aplicación se han obtenido deformaciones entre 0.4 y 0.8% , con una carga de hielo en el rango de 30 a 60 N/m, y generalmente a sido sobre postes de línea telefónica.

En el caso del diseño del cable óptico aéreo para líneas de alta tensión se requiere someter



al cable a condiciones más severas de operación debido a que los claros entre torres son por lo general mayores a 100 metros, y las condiciones ambientales de la zonas donde debe de operar pueden ser muy variables.

Por ello se han diseñado diferentes tipos de cables basados en los de estructuras libres a fin de reducir la carga mecánica de las fibras durante su operación normal.

Existen tres tipos de diseño empleados: cable unido a mensajero, cable autoportado y cable interconstruido.

El cable unido a mensajero tiene la ventaja de permitir un adecuado tensionado del cable óptico de acuerdo a las condiciones de carga o de "deslizamiento", y a las deformaciones plásticas, ambas del orden de 0.1% (ver fig. 5.-17). El problema más importante es asegurar la igualdad de elongaciones para el cable mensajero y el cable óptico a fin de evitar tensiones excesivas o concentradas en los puntos de amarre lo que implica que para líneas en operación se diseñe el cable a la medida. Otro aspecto a tomar en cuenta es la incidencia de descargas atmosféricas sobre el cable lo que puede dañar al cable óptico si no posee un amarre dieléctrico seccional, o si la protección del cable óptico no es adecuada.

El cable autoportado presenta el problema de agregarse a los cables de la línea instalados, lo que puede causar sobrecargas mecánicas en algunos tramos sobre las torres; sin embargo, se ha desarrollado un diseño de tipo dieléctrico que puede disminuir estos problemas, aunque para los claros que normalmente se requieren en las líneas de alta tensión no se han obtenido buenos resultados, sobretodo por los efectos de galopeo, y vibraciones por influencia del viento. (ver fig. 5.-17).

El diseño de cable interconstruido tiene la ventaja poder cumplir las funciones de un cable de potencia (conductor de fase o cable de guarda) y las de un cable de telecomunicación, ya que el cable óptico se encuentra contenido propiamente dentro del cable de potencia, y así evitar modificar las torres para la instalación de un cable adicional. Además, las características mecánicas del cable conductor y del elemento de refuerzo central permiten a las fibras ópticas cierta holgura en el margen de elongación; en forma experimental se han instalado algunos tramos de cable de guarda óptico, empleando estructuras de fibras libres en tubos y estructuras cilíndricas ranuradas; las estructuras de ambos cables se muestran en las figuras 5.-18 y 5.-19.

La tendencia de dichos diseños es de que cumplan con las especificaciones propias de un cable conductor ya sea de fase o de guarda, de manera que su instalación en las líneas ya existentes resulte inmediata

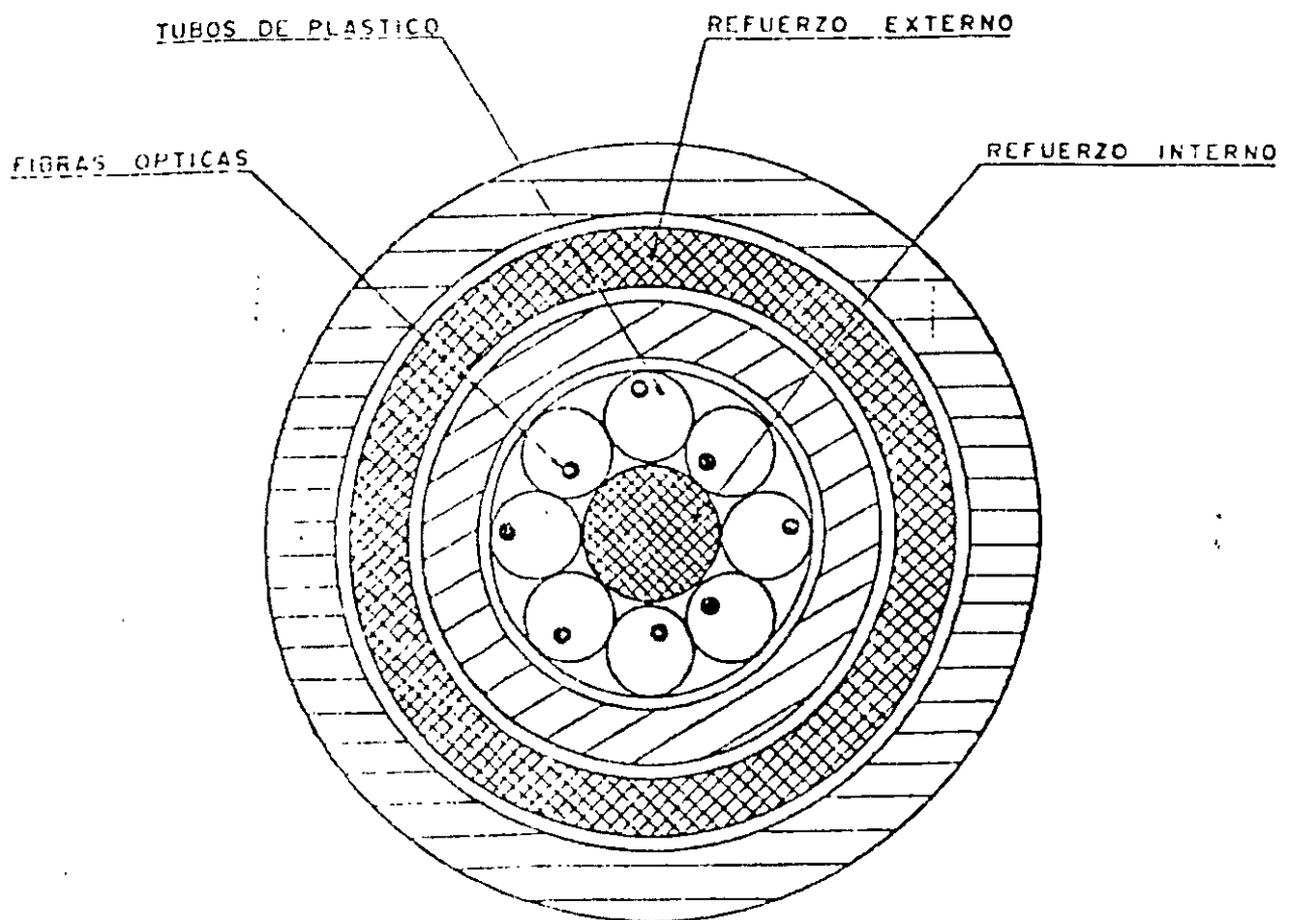


FIG. 5.-17 CABLE AUTOSOPORTADO

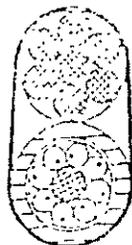
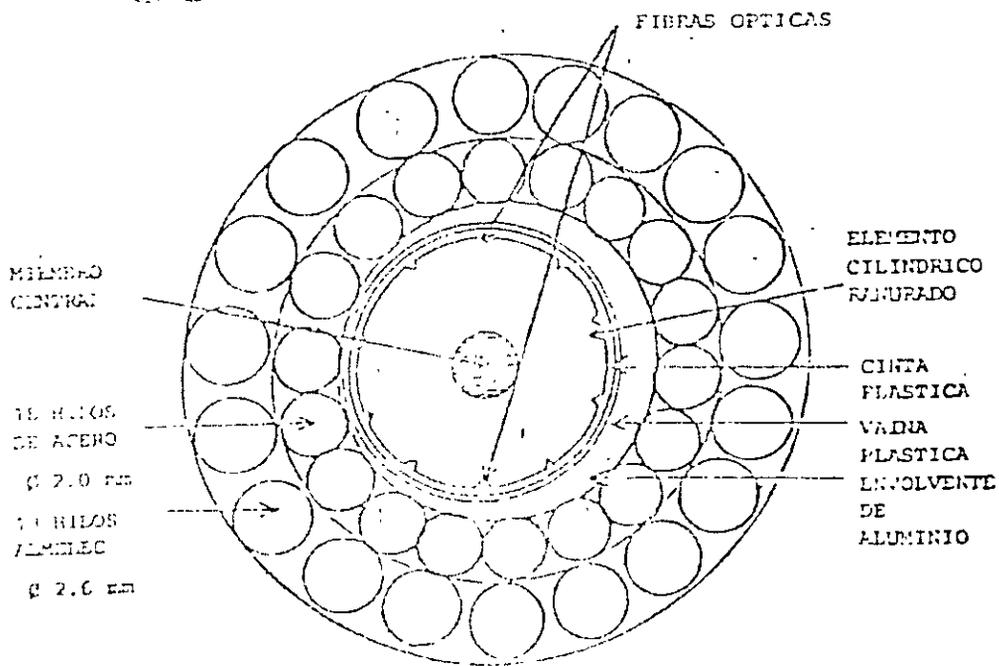
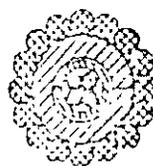
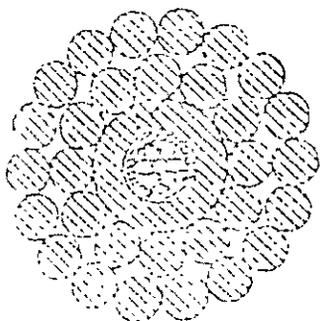


Fig. 5.-18 Cable Óptico unido a mensajero



DIAMETRO EXTERIOR : 18.5 mm

Fig. 5.-19 Cable Óptico interconstruido en el cable

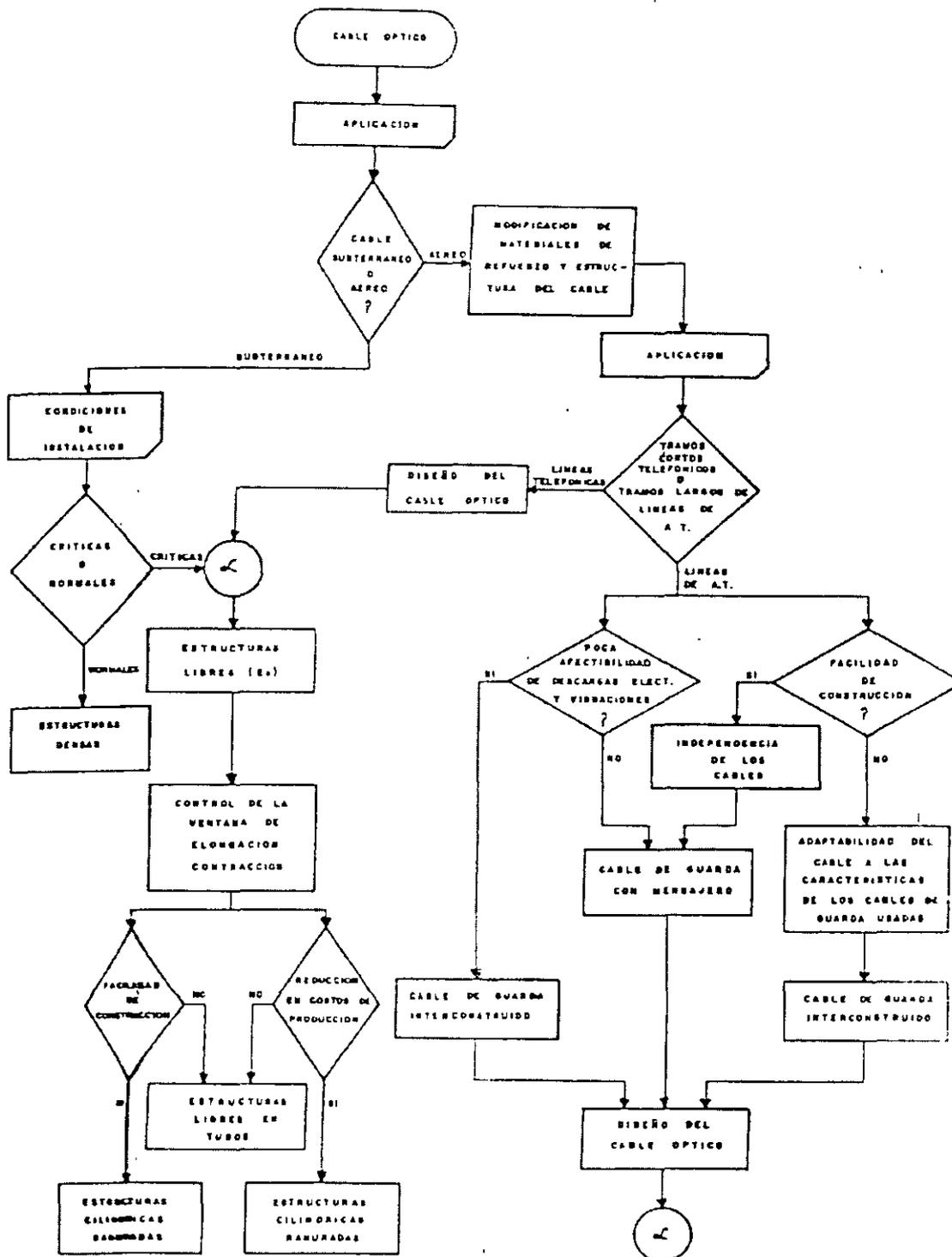


FIG. 20 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO Y SELECCION DEL CABLE OPTICO SEGUN SUS PRINCIPALES APLICACIONES.



### c) Instalación Submarina

La aplicación de las fibras ópticas en cable submarino es una de las que se espera obtener mayores beneficios de comunicación; desde hace varios años se ha venido experimentando en países como Japón y Canadá los enlaces submarinos para la intercomunicación entre islas o con el continente.

Sin embargo, en 1985 se pretende realizar la instalación del primer cable submarino transcontinental que viajará de Estados Unidos hasta Francia e Inglaterra. Dicho cable denominado TAT-8 entrará en operación para 1988 con un costo de inversión de 355 millones USD.; con el objeto de resistir las grandes presiones hidráulicas en el fondo del mar y los esfuerzos de tensión durante las maniobras de instalación se requiere una protección mecánica en la que el elemento principal de diseño es el tubo donde se contiene a las fibras ópticas. Dicho tubo debe soportar deformaciones de 0.5 a -0.7% y permitir la conducción de energía eléctrica a fin de telealimentar a los repetidores, proporcionando un canal de comunicación de emergencia. En la figura 5.-20 se resumen algunos de los criterios aplicados de acuerdo al tipo de estructuras disponibles para la selección del cable óptico a instalar.

## ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS DE DESARROLLO

En general, el mercado de cables ópticos está muy diversificado<sup>38 38</sup> por el gran número de aplicaciones disponibles, aunque se puede hablar de tres aplicaciones principales: un mercado orientado a satisfacer las demandas de enlaces entre computadoras o terminales de video a corta distancia con requerimientos bajos de ancho de banda, (entre 20 y 200 MHz. Km), y valores de atenuación relativamente altos (6 y 7 dB/Km); en este tipo de aplicaciones, las características del diámetro del núcleo y revestimiento presentan una relación 100/140 $\mu$ m, siendo de tipo multimodo con índice graduado y semigraduado en algunos casos particulares se aplican fibras multimodo de índice escalonado con una relación 200/230 $\mu$ m, presentando atenuaciones de 8 a 10 dB/Km. y anchos de banda menores a 10 Mhz. Km. Esta aplicación ha tenido una gran aceptación sobre todo en medios donde las necesidades son de protección de la calidad de la transmisión más que de alta velocidad y capacidad. A fin de aumentar la estandarización del uso de conectores se está ofreciendo una fibra con relación 85/125 $\mu$ m a fin de sustituir la de 100/140 anteriormente utilizada.

La segunda parte del mercado se ha enfocado al sector de telecomunicaciones donde la participación de las empresas telefónicas ha sido preponderante para el desarrollo de la mayoría de los tipos de cables ópticos disponibles; dicha demanda ha surgido como una necesidad de medios de comunicación con mayores posibilidades de expansión no sólo en cuanto a volúmenes de información o velocidades de transmisión sino también en lo que



respecta a medios alternativos de comunicación como son transmisión de datos para enlaces interurbanos entre computadoras o la transmisión de canales de video, todo ello en la misma línea óptica a través de los diferentes métodos de multicanalización disponibles. Para este tipo de aplicación, la fibra óptica trabaja con una relación de diámetros núcleo-revestimiento de  $50/125\mu\text{m}$ , pudiendo operar bajo dos ventanas, de acuerdo a la longitud de onda de emisión del dispositivo; obviamente entre mayor sea la longitud de onda de emisión a la que responda la fibra, mayor será el costo de ella por metro; en este caso, las dos longitudes de onda de emisión disponibles en el mercado son  $0.85\mu\text{m}$  y  $1.3\mu\text{m}$ . En forma alternativa se están fabricando fibras ópticas que responden en ambas ventanas de emisión con valores de atenuación de  $2.4\text{ dB/Km}$  para  $0.85\mu\text{m}$  y  $1.0\text{ dB/Km}$  para  $1.3\mu\text{m}$ , con un ancho de banda mínimo de  $800\text{ MHz}\cdot\text{Km}$ .

La variedad de estructuras disponibles para comunicación ha requerido al usuario la especificación de sus necesidades de aplicación; en general se puede decir que las estructuras densas se utilizan para aplicaciones con pocos requerimientos de esfuerzos sobre el cable, aunque para instalaciones subterráneas es recomendable proveer al diseño del cable de una protección metálica que evite la acción de roedores, y de capas plásticas que lo aislen de la influencia de la humedad. Sin embargo, para condiciones de instalación subterránea crítica, o para instalaciones aéreas, se recomienda el uso de estructuras de fibras ópticas libres, que permiten un margen de elongación para las fibras, antes de que aparezcan microcurvaturas sobre ella.

En este aspecto, es aconsejable que dicho margen de elongación sea mayor al 1%, a fin de que las fibras estén protegidas mecánicamente ante esfuerzos de elongación no mayores al 0.2%.

El tercer mercado disponible es de tipo potencial, y está orientado al desarrollo de fibras ópticas monomodales de índice escalonado con características de núcleo muy reducido ( $7-9\mu\text{m}$ ) y diámetro del revestimiento normalizado ( $125\mu\text{m}$ ); dichas fibras tienen rangos de atenuación entre  $0.2$  y  $0.3\text{ dB/Km}$ , dependiendo de la longitud de onda de emisión. Su aplicación actual es para enlaces experimentales de altas velocidades (cientos de Mb/s) y para medir diferentes fenómenos con alta resolución rápida respuesta.

La fibra óptica unimodo está disponible en el mercado de manera comercial, habiendo tenido un crecimiento de demanda a partir de 1984, debido al desarrollo de dispositivos emisores y detectores para operar en rangos de  $1300$  a  $1600\text{ nm}$  con alta calidad, así como de conectores, empalmadores de fusión controlados por microprocesador y OTDR adecuados para trabajar con las dimensiones tan reducidas del núcleo en dicha fibra. Esta ha provocado un descenso de los costos de la misma, resultando ahora más barata una fibra unimodo que la de tipo multimodo.



De lo anterior se puede concluir que la tendencia del mercado actual se inclina hacia el uso de cables ópticos con fibras unimodo, aunque para enlaces de redes locales se emplee la de tipo multimodo de índice escalonado o gradual; la diversificación en el uso de esta tecnología ha generado un abatimiento en los costos de producción, tanto de la fibra óptica como del cable mismo. Se busca pues, tener una estructura básica de cable que puede responder a las diferentes condiciones mecánicas y ambientales requeridas para su operación, asegurando su confiabilidad y durabilidad.

## AVANCES TECNOLOGICOS EN FIBRAS OPTICAS

En este momento existen varios tipos de fibras ópticas disponibles en el mercado, con diversas características, de acuerdo a la aplicación; sin embargo, en un principio, las primeras fibras ópticas desarrolladas poseían un núcleo de algunas micras de diámetro, pudiendo transmitir luz en un modo de propagación. Debido a la dificultad de acoplamiento óptico en un núcleo reducido, lo que implicaba altas pérdidas, se buscó el desarrollo de fibras con núcleos de varias decenas de micras, a fin de poder soportar varios modos de propagación. Dichas fibras fueron utilizadas comercialmente en conjunto a fuentes semi conductoras láser de GaAlAs con longitudes de onda; entre 800 y 900 nm (primera ventana). Posteriormente, la investigación ha demostrado que se pueden obtener más bajas atenuaciones y un mayor ancho de banda trabajando a 1300 nm (segunda ventana) a través de láseres de tipo InGaAsP.

Conforme el desarrollo de la óptica de acoplamiento y de empalme se ha ido mejorando, y las características de concentricidad y ovalamiento del núcleo en la fibra unimodo se han perfeccionado, se ha podido lograr la comercialización de la fibra unimodo de índice escalonado en forma masiva desde 1985, lo que ha permitido atacar el mercado del cable troncal de alta capacidad. Asimismo, ya se encuentra disponible la Cuarta Generación de fibra óptica con mayor ancho de banda operando a 1550 nm, y con atenuaciones del orden de 0.15 dB/km, permitiendo espaciamiento de repetidores hasta de 100 km. Sin embargo, el ancho de banda no es infinito: la dispersión del material y la de guía de onda son sus principales limitantes; la primera debido a la variación de respuesta del índice de refracción con la longitud de onda, la segunda ocurre porque la luz en la fibra óptica unimodo no se confine por completo en el núcleo, sino que un 20% de ésta viaja en el revestimiento adyacente, núcleo de índice escalonado

Ambos factores se han logrado cancelar en fibras de silicio dopadas con germanio a 1300 nm lográndose "cero dispersión"; esto también ha ayudado en las fibras de índice graduado ya que elimina el aumento de la dispersión, logrando un incremento en el ancho espectral de



la fuente.

En la actualidad la fibra unimodo permite transmitir arriba de 400 Mb/s con espaciamento de repetidores de varias decenas de kilómetros; sin embargo, la máxima velocidad de transmisión y la distancia de alcance tanto en las fibras como en las fuentes láser se encuentran poco optimizadas, ya que la "cero dispersión" se localiza a 1300 nm, mientras que la mínima pérdida está en 1550 nm, y como la dispersión es proporcional al ancho de la fuente espectral, la optimización puede lograrse haciendo más angosto el ancho espectral del láser, o disminuyendo la dispersión a 1550 nm .

En el primer caso, la Compañía AT&T ha logrado estabilizar láseres en longitud de onda, transmitiendo a 4 Gb/s a través de 103 km. de fibra unimodo sin repetidor. A pesar de estos resultados todavía es compleja la estructura de soporte para dichas fuentes a 1550 nm como para volverse totalmente comerciales.

La otra alternativa es reducir la dispersión en la fibra, ya sea corriendo la longitud de "cero dispersión" a 1550 nm o distribuyendo la dispersión hacia un valor mínimo sobre un rango de mayor cobertura. La dispersión del material es difícil de alterar; por lo que se ha preferido modificar la dispersión de guía de onda pasando de un diseño de índice escalonado simple a perfiles más complejos como se muestran en la Fig. 5-21; de esta forma, la suma de ambas dispersiones pueden generar valores de cero o de muy baja dispersión sobre valores entre 1300 y 1550 nm, éstas se conocen como fibras de "dispersión corrida" y de "dispersión aplanada" respectivamente. Las primeras son fáciles de fabricar, ya que requieren que los parámetros de diseño de la fibra se ajusten para optimizar la dispersión a una longitud de onda. En el caso de las fibras con "dispersión aplanada" son más complejas de diseñar porque el ajuste se efectúa sobre un rango relativamente amplio. No obstante Corning Glass Works ha logrado fabricar fibra óptica con valores de atenuación ligeramente mayores a los normalmente obtenidos con el diseño de "dispersión corrida" a 1550 nm. Aunque nunca se puedan obtener las ventajas de maximizar la tasa de transmisión con respecto a la distancia, este diseño permite contemplar la posibilidad de multiplexar en el dominio de la longitud de onda (WDM) y así optimizar el uso de la fibra a futuro, pudiendo trabajar a 1300 nm ya 1550 nm.

El siguiente nivel de sofisticación en los sistemas de comunicación ópticos requiere de una alta calidad en la sensibilidad del receptor, lo cual puede obtenerse por medio de una detección homodina o heterodina de la señal. Este sistema puede permitir el manejo de WDM de varias portadoras ópticas con una separación muy angosta comparado con el espaciamento de diversos canales multiplexados de manera convencional. En la Fig. 5.-22 se observan las diferentes generaciones de sistemas por fibras ópticas.

Para lograr esta transmisión óptica "coherente", es necesario el uso de fibras no



convencionales ya que las de tipo unimodo normalmente propagan dos modos ortogonalmente polarizados de muy bajo orden; para solucionar dicho problema ya que evita la igualdad en los estados de polarización de la señal transmitida con el oscilador local, se fabrican a nivel experimental fibras unipolarizadas mediante el manejo de simetrías no circulares en el índice de refracción del núcleo o cercano a él.

Finalmente, se está experimentando con fibras ópticas a longitudes de onda mayores a 1800 nm a fin de obtener atenuaciones menores de señal.

FIG. 5.21 DISEÑOS DE FIBRA OPTICA UNIMODO.

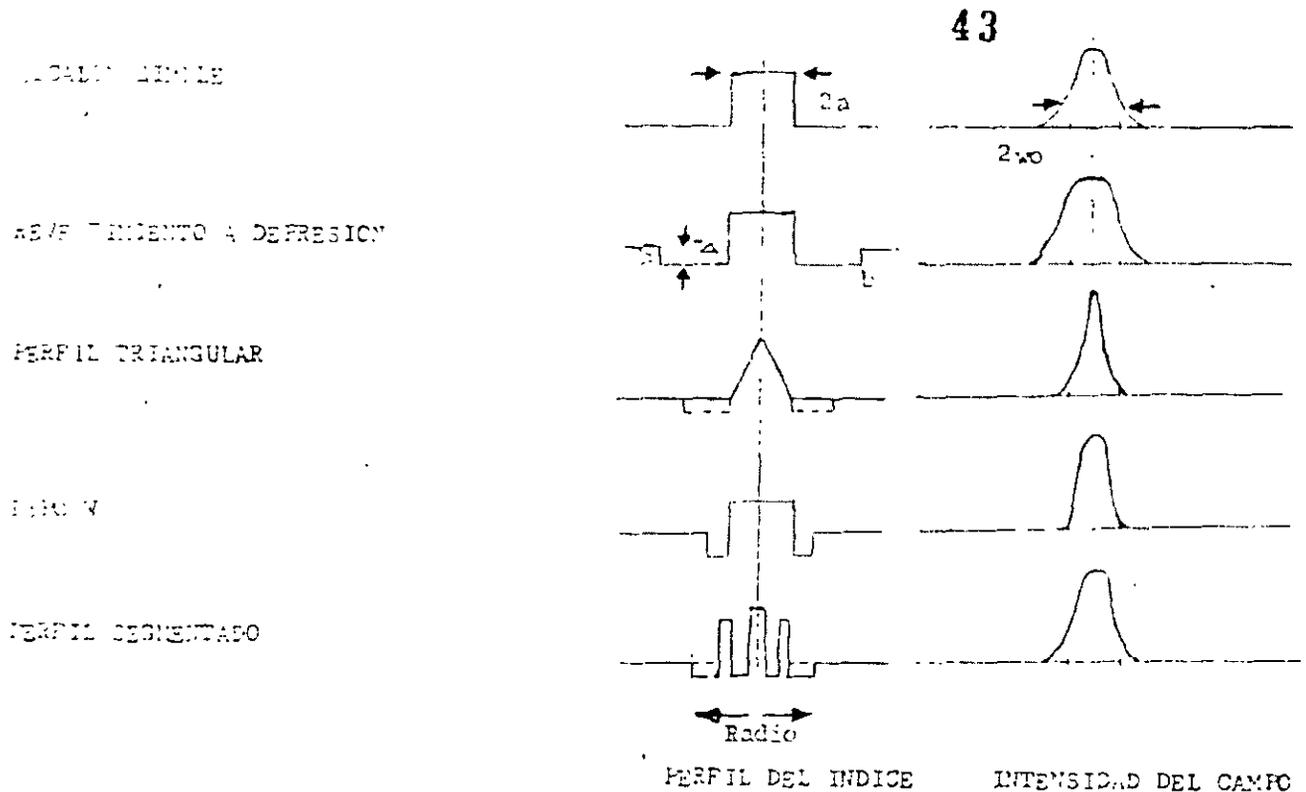
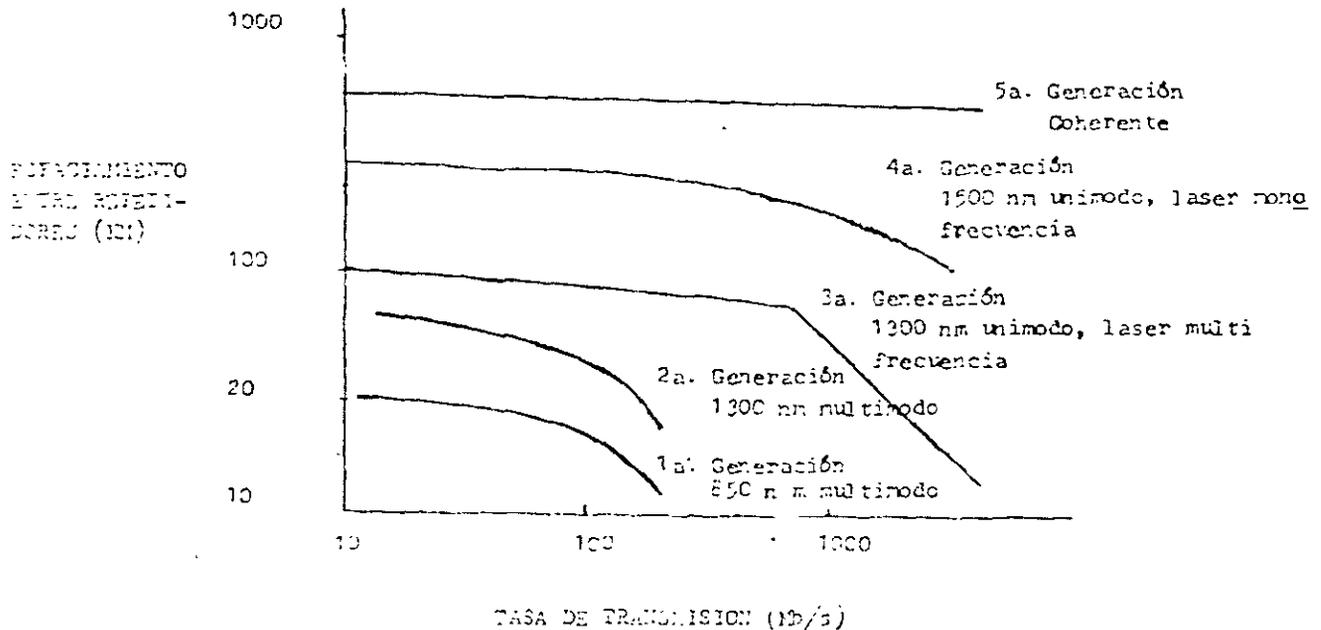


FIG. 5.22 5 GENERACIONES EN SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA



Dichas fibras requieren de materiales cuya absorción por vibración molecular ocurre sólo a grandes longitudes de onda; esto puede lograrse reduciendo las fuerzas de doblez y/o incrementando la vibración de masas. Las alternativas son las siguientes:

- Reemplazo del silicio por materiales más pesados (Ge, Pb, Ca, Ba).
- Reemplazo del oxígeno por elementos como S, Se y Te.

Resulta generalmente cierto que una reducción de las fuerzas de doblez es acompañada por un incremento de la actividad química. De esta forma, el vidrio se vuelve más sensible en los procesos de envejecimiento. Es por ello que existe un compromiso entre la transmisión y su estabilidad.

Sin embargo, aunque los problemas tecnológicos no están completamente resueltos, se espera la disponibilidad en la próxima década de fibras con atenuaciones mucho menores a 0.1 dB/km. en el rango de los 2000 a los 5000 nm .



## REFERENCIA DEL CAPITULO

- 1.- Corning Glass Works, información técnica, Febrero 1985.
- 2.- Midwinter J.E. , "Optical Fibres for Transmission"  
John Wiley & Sons, New York, 1979, 260-307.
- 3.- Le Noane G., "Cables de Fibras Opticas", Boletín de Telecomunicaciones, 48(11), 1981, 649-656.
- 4.- Baden, J.L. , "AT&T Bell Labs, Array Splicing"  
OFC 85 Febrero. Pag. 106
- 5.- Bark P.R. , D.O. Lawrence, H.M. Liertz, O.I. Szentesi U. Oestrich, y G. Zeidler, "Cable Design Testing and Installation" International Fiber Optics and Communications (IFOC), 3(2) 1982, 22-33
- 6.- Bark P.R. , U. Oestrich y G. Zeidler, "Fiber Optic Cable Design Testing and Installation Experiences", 27th International Wire & Cable Symposium Proceeding, 1978, 379-384.
- 7.- Boscher D.G. LeNoane, Q.B. Nonclercq y A. Zaganiaris "Optical Fibre Cables Using V-Grooved Cylindrical Units: High Performance Cable", Fiber & Integrated Optics, 4(1), 1982, 67-94.
- 8.- Boscher D. , Q.B. Nonclercq, "Ultra Low Loss Optical Fibre Cable Design and Characterization" Comunicación escrita CNET, Lannion Francia.
- 9.- Vecchis M. de, J. P. Huilin y J.C. Staath, "Ultra Low Loss -Cables Using the Cylindrical V-Grooved Structure", Thomson CSF/ LTT, 30th International Wire & Cable Symposium Proceeding, 1981, 228-235.
- 10.- Información Técnica Thomson CSF, "Cables de Fibra Optica".
- 11.- Oestrich, V. , Zeidler, G. , Bark, P.R. , Lawrence, D.O., Fiber Optic Cable for application. International Wire & Cable Symposium proceedings 1980, pp. 394-400.
- 12.- Light Wave, the journal of Fiber Optics, Febrero 1985. 22-23.
- 13.- KECK, DONALD. "Fundamentals of Optical Waveguide Fibers", IEEE Comms. Vol. 23. No.5 May, 1985 pp. 17-22.



14.- Basch, Brown; "Introduction to Coherent Optical Fiber Transmission", IEEE- Comms. Vol. 23. No.5 May, 1985. pp 23-29.

15.- Oestreich, U., Zeidler, G. ; "Development Trends in Fiber and Cable" Telcom Report 6 "Optical Communications" (1983) pp 198~ 201.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**DISPERSIÓN POR POLARIZACIÓN  
DE MODO P.M.D.**

**CONFERENCISTA  
ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

---

## 1.- DISPERSION POR POLARIZACION DE MODO PMD.

Ing. Fernando Navarrete Montes de Oca.

E.S.I.M.E.-I.P.N.

Tel. 729 60 00 ext. 54 595

navarret@maya.esimez.ipn.mx

En las fibras ópticas reales la polarización de la luz que se inyecta a la entrada de la fibra, experimenta variaciones a lo largo de su longitud. Esto representa un inconveniente en los sistemas ópticos coherentes en los cuales la señal óptica incidente se sobrepone en el campo del oscilador local. También este efecto está limitando los enlaces en general a partir de tasas de transmisión de 2.5 Gbps. La polarización también es importante cuando una fibra monomodo se acopla a un modulador u otro dispositivo de guía onda que requiera que la luz tenga una polarización lineal para operación eficiente.

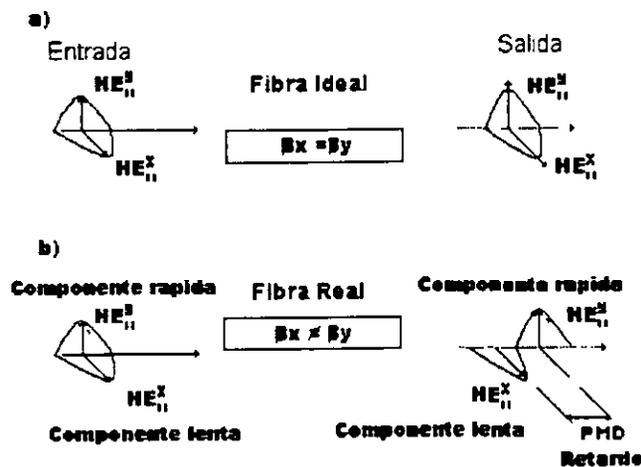
Cuando la luz se propaga en una fibra birrefringente, la interferencia y diferencias de retardo entre los modos polarizados ortogonalmente puede ocasionar ruido modal por polarización (pérdida dependiente de la polarización PDL) y dispersión por polarización de modo PDM respectivamente. Estos mecanismos de pérdida PDL y distorsión PMD limitan el ancho de banda de la fibra, en la transmisión digital por ensanchamiento de pulsos y en sistemas analógicos por distorsión de la señal de A.M.

### 1.1.- POLARIZACION Y BIRREFRINGENCIA

Considerando una onda de luz que se desplaza en dirección Z a lo largo de una fibra óptica tendrá sus componentes de campo en dirección X y dirección Y ambas ortogonales entre sí y representan la polarización de la onda. La polarización de una onda de luz, está representada por la dirección de su variación o vibración. La variación puede ser en el eje X o en eje Y (polarización lineal) o en los dos ejes al mismo tiempo (polarización elíptica) estos ejes representan cada modo de polarización.

En las fibras ópticas monomodo en términos prácticos, se propagan dos modos casi degenerados con polarización ortogonal. Así que esta fibra realmente es bimodal soportando los modos  $HE_{11}^x$  y  $HE_{11}^y$  polarizados dirección x y dirección y.

Para una fibra monomodo ideal los dos ejes de polarización (x, y) tienen la misma distribución o componentes de campo dado por  $HE_{11}$  y además en los dos ejes existe el mismo valor de índice de refracción efectivo (material isotrópico), por lo tanto la constante de propagación es igual en los dos ejes es decir  $\beta_x = \beta_y$ . Con estas características los dos modos se propagan a través de la fibra con la misma velocidad ( $v = \frac{c}{n}$ ) arribando a la salida de la fibra al mismo tiempo y manteniendo el estado de polarización del principio de la fibra, ver fig. 1a



**Fig. 1** Propagación en una fibra monomodo de un pulso de luz polarizado en X-Y para:  
a) Una fibra ideal b) Una fibra real

Cuando el pulso óptico se propaga en una fibra real, esta afectado por las imperfecciones geométricas de la fibra así como a la anisotropía del material de la guía. Esto produce en la fibra birrefringencia con lo cual en cada eje de polarización se tendrán diferentes valores del índice de refracción efectivo, en estas condiciones se pierde la degeneración de los modos  $HE_{11}^x$  y  $HE_{11}^y$  y por lo tanto cada modo se propaga con una velocidad de grupo diferente y constante de propagación diferente  $\beta_x \neq \beta_y$ .

En la fig.4b se muestran las dos componentes de los pulsos de entrada y salida, se supone que la componente rápida se encuentra en el eje Y y la lenta en X, como se observa a la salida de la fibra existe un retardo entre los tiempos de arribo de los pulsos de entrada, este retardo se conoce como PMD y se mide normalmente en picosegundos. La birrefringencia BF para una fibra esta dada por :

$$BF = \frac{\beta_x - \beta_y}{2\pi / \lambda} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda

La diferencia en velocidades de fases originan que la fibra tenga un retardo lineal  $\phi(z)$  el cual depende de la longitud L de la fibra y esta dada por :

$$\phi(z) = (\beta_x - \beta_y)L \quad (2)$$

Como la señal óptica se propaga en un medio birrefringente,  $\beta_x \neq \beta_y$  ; por lo tanto los dos modos tienen diferentes retardos de grupo es decir  $\tau_{gx} \neq \tau_{gy}$ , existiendo una diferencia de retardo entre los dos modos dada por :

$$\delta \tau_g = \tau_{gx} - \tau_{gy} \quad (3)$$

Donde  $\delta \tau_g$  se conoce como dispersión de modo por polarización (PMD). El valor de PMD oscila de mucho menos de  $1psKm^{-1}$  para fibras convencionales y hasta más de  $1nsKm^{-1}$  para fibras que mantienen la polarización PM de alta birrefringencia. Los dos modos que se inyectan a la fibra tienen generalmente diferentes velocidades de grupo por consiguiente a la salida de una fibra de longitud "L" se tendrá que los modos están separados un intervalo  $\delta \tau_g L$ . Para fibras de alta birrefringencia se obtiene una buena aproximación del ensanchamiento del pulso en una fibra larga por medio del producto  $\delta \tau_g L$ . Para este caso el ancho de banda B a 3dB está dado por:

$$B = \frac{0.9}{\delta \tau_g L} \quad (4)$$

Para fibras de longitud corta y fibras con longitud mayor a la longitud de acoplamiento característico  $L_0$ , la dispersión del pulso es proporcional a  $(LL_0)^{1/2}$  en lugar de simplemente L. Además para transmisión digital la máxima tasa de transmisión digital  $B_i(max)$  en relación con la dispersión por polarización de modo se puede calcular de

$$B_i(max) = \frac{B}{0.55} \quad (5)$$

## 1.2.- Medición de Dispersión Cromática

La medición de la dispersión en una fibra óptica es una parte muy importante de su caracterización. Existen varios métodos, la elección depende de características como el tipo de dispersión que se va a medir y de la precisión requerida. Como resultado de las mediciones se obtienen parámetros como el ancho de banda, para una longitud específica o la dispersión D. Las técnicas de medición se pueden agrupar en dos categorías que son en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia

### 1.2.1.-Medición en el dominio del tiempo

La medición de dispersión en fibras monomodo con esta técnica incluye mediciones de retardo de grupo. Específicamente, se propagan a través de la longitud de la fibra pulsos individuales con diferente frecuencia de portadora. De acuerdo con la variación de frecuencia se miden las diferencias en el retardo de grupo de los pulsos. Obteniéndose la medición de  $dN_f / d\lambda$  y con esto se encuentra la dispersión D a partir de:

$$D(\lambda) = \frac{1}{c} \frac{dN_f}{d\lambda} \quad (6)$$

---

Donde  $N_g$  el parámetro del índice de grupo en el cual se incluyen los efectos combinados de la dispersión material, de guía de onda y de perfil.

### 1.2.2.-Medición en el dominio de la frecuencia

La técnica se basa en la medición de los defasamientos que ocurren en una onda modulada que se propaga en una fibra. La dispersión  $D(\lambda)$  se obtiene a partir de :

$$D(\lambda) = \frac{dt_g}{d\lambda} = \frac{\Delta\phi}{z\Omega\Delta\lambda} \quad (7)$$

Donde  $\Omega$  es una modulación senoidal de frecuencia lenta,  $t_g$  es el retardo de grupo dependiente de la longitud de onda  $\lambda$ ,  $\Delta\phi = \Omega t \Delta$  es la diferencia de fase entre las dos frecuencias de portadoras diferentes para la distancia  $z$ ,  $\Delta t$  es la diferencia en el retardo de grupo respectivo.

### 1.2.3.- Equipo de medición de dispersión cromática

En el mercado existen equipos de diferentes fabricantes para medir la dispersión cromática. Como ejemplo se describe a continuación las características y resultados que se obtienen con el equipo de uno de los proveedores.

#### Medidor de dispersión cromática EG&G FD4

El sistema está diseñado para medir la dispersión cromática, la atenuación espectral y la longitud de la fibra óptica, Su operación fácil lo hacen apto para aplicaciones tanto de laboratorio como de campo

El FD4 usa una técnica de demodulación doble con lo que se mide directamente la dispersión cromática en la fibra. Esto contrasta con muchos otros equipos de medición de dispersión diseñados con una tecnología antigua, la cual mide el retardo de grupo en el tiempo como una función de la longitud de onda, para después calcular la dispersión. Algunas de sus características más importantes son :

- Medición directa de dispersión cromática,  $\lambda$  cero y pendiente.
- Aplicable a fibras monomodo normales, de dispersión corrida y dispersión aplanada.
- Alta precisión y repetibilidad
- Mediciones en el rango de 1250 nm a 1600 nm.
- Diseño óptica de estado sólido con gran confiabilidad.
- Fácil operación para trabajos de campo.

# FD4 CHROMATIC DISPERSION SYSTEM

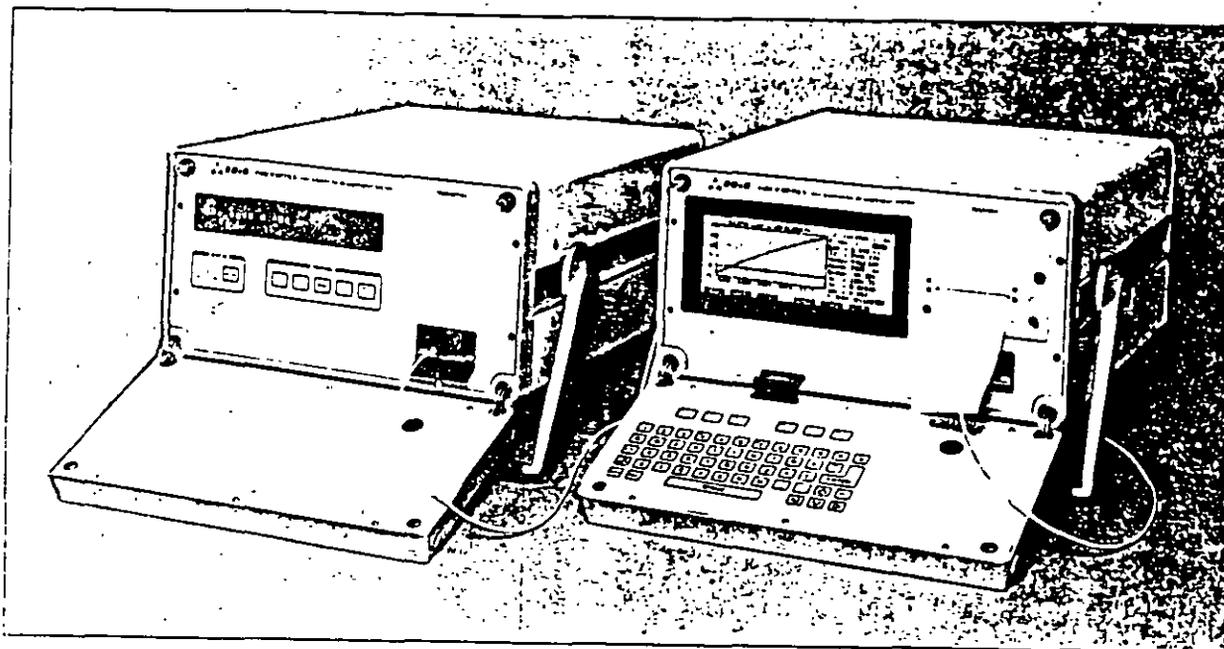
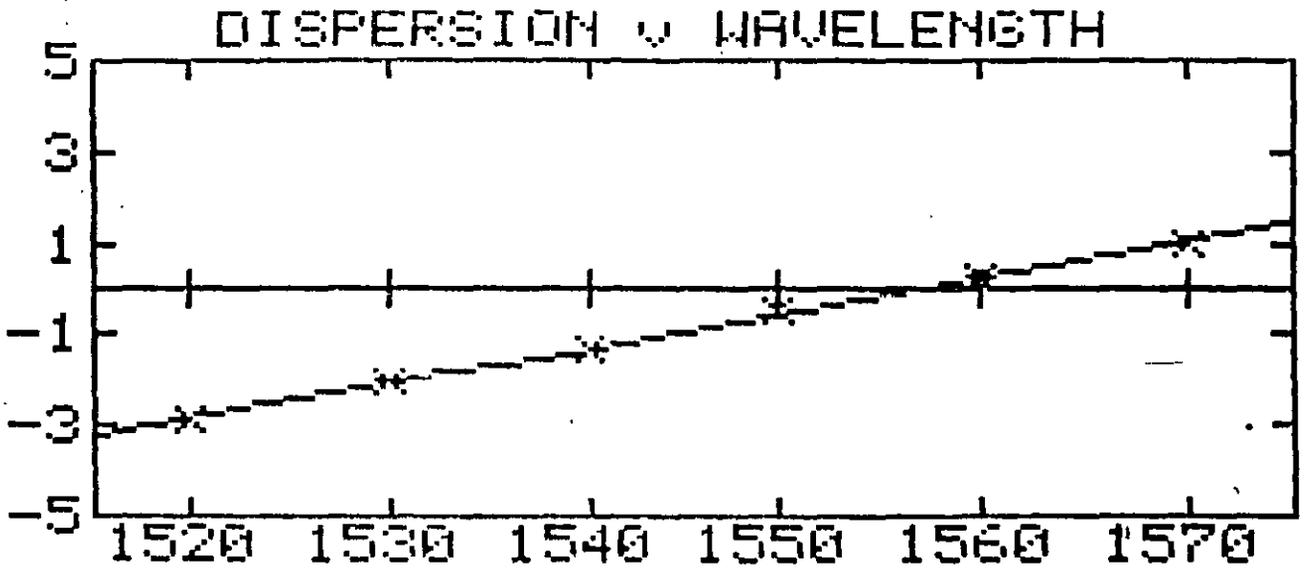


Figura 2 .- Equipo para medir dispersión cromática FD4 de EG&G.

EG&G FIBER OPTICS FD4  
SINGLE MODE FIBER CHROMATIC DISPERSION

FIBER I.D.   
FIBER LENGTH 142.690 Km  
MESSAGE Pre-Shipment  
TIME OF test 11:49:10 01 May 1976  
SYSTEM Id 631  
DATA FIT LINEAR FIT  
TEST FILE LONG SHIFTED FIBER >150km  
START POWER 17.3 dB at 1550nm  
POWER CHANGE 0.0 dB at 1550nm  
LOSS 30.4 dB at 1550nm



WAVELENGTH nm	DISPERSION ps/Km
1520	-2.85
1530	-2.07
1540	-1.30
1550	-0.54
1560	0.24
1570	0.99

B = 1.086e-02      C = -1.197e+02  
SLOPE = 0.07686ps.nm-2.Km-1.      LAMBDA ZERO = 1556.982nm.      SEE = 0.013

Figura 3.- Medición de dispersión cromática.

---

### 1.3.- Medición de la dispersión por polarización de modo PMD

La PMD es una dispersión de modo que resulta del hecho que una fibra monomodo soporta dos estados de polarización o modos. Estos dos modos polarizados viajan con diferente velocidad de grupo (debido a la birrefringencia del material), dando lugar a una forma de dispersión modal conocida como PMD. La birrefringencia intrínseca de la fibra frecuentemente se debe al proceso de manufactura en el cual se produce una no circularidad del núcleo o por esfuerzos térmicos asimétricos que producen la PMD. Los esfuerzos mecánicos durante la instalación del cable también afectan la PMD, al igual que los cambios ambientales durante la operación. La PMD afecta no solo a la fibra sino también a componentes como divisores de potencia, atenuadores, switches, etc.

La PMD reduce el ancho de banda y tasa de bits en los sistemas digitales. Aunque este efecto es propio de tasa de bits elevada  $> 10$  Gbps, empieza a aparecer en los sistemas de 2.5 Gbps con fibras normales. En los sistemas analógicos la PMD causa una distorsión de segundo orden que deteriora la señal de vida en A.M.

#### 1.3.3.- Técnicas de medición de la PMD

Para medir la PMD se tienen dos técnicas fundamentales : una es en el dominio temporal y la otra en el dominio espectral.

En la técnica temporal se evalúa la desviación promedio del tiempo de propagación de la señal óptica en la fibra. En este enfoque se usan dos métodos : 1) Barrido de longitudes de onda con transformación de Fourier, 2) Método interferométrico.

En la técnica espectral se calcula el promedio de retraso de los grupos diferenciales que representan a los diferentes estados de polarización. El enfoque espectral propone dos métodos : 1) Barrido de longitud de onda con cuantificación de extremos, 2) Método polarimétrico.

Uno de los fabricantes importantes para medir la PMD usa en sus equipos el método interferométrico, por esta razón, a continuación se presenta el esquema básico de medición con este método.

#### 1.3.2.- Método interferométrico

En la figura 4 se muestra la configuración típica del interferómetro

# Método interferométrico

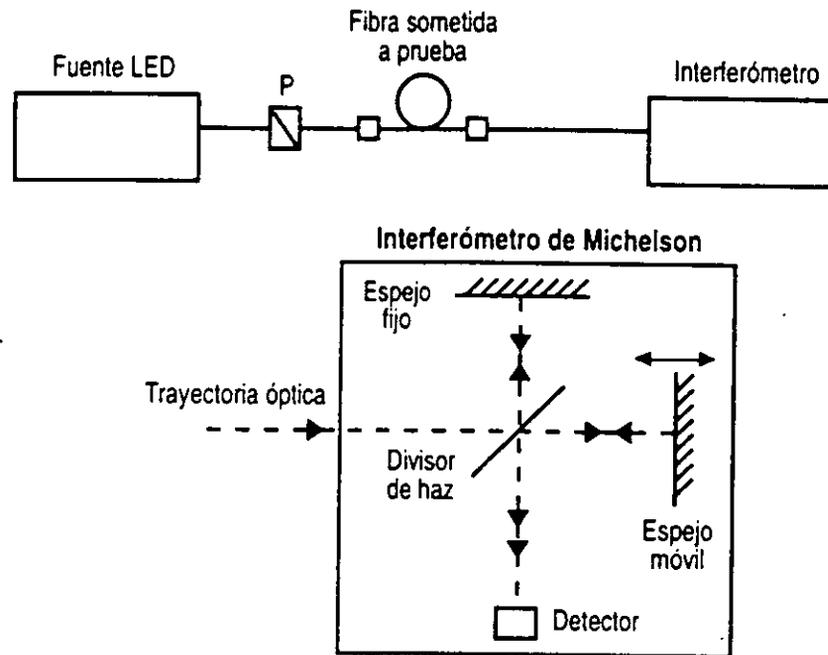


Figura 4.- Medición de la PMD por el método interferométrico.

A manera de ejemplo a continuación se presentan las características sobresalientes y resultados obtenidos con uno de los equipos populares para medir PMD.

Equipo de medición de dispersión por polarización de modo GAP PMD II de EXFO.

Este equipo usa la técnica interferométrica. Consiste de dos unidades, una fuente de tipo manual y el analizador PMD II. Se necesita una computadora compatible que tenga Windows™ para ver y almacenar los resultados. El analizador PMD II tiene un detector con un interferómetro con fibra tipo Michelson figura 5. El retardo de PMD se calcula del segundo momento del interferograma. No se tiene que hacer ningún cálculo, el sistema colecta los datos del interferograma y los ajusta al tope de una curva de distribución Gaussiana. La medición total de la PMD en la fibra se da como un retardo total en picosegundos y también como un coeficiente PMD en picosegundos /  $\sqrt{km}$ .

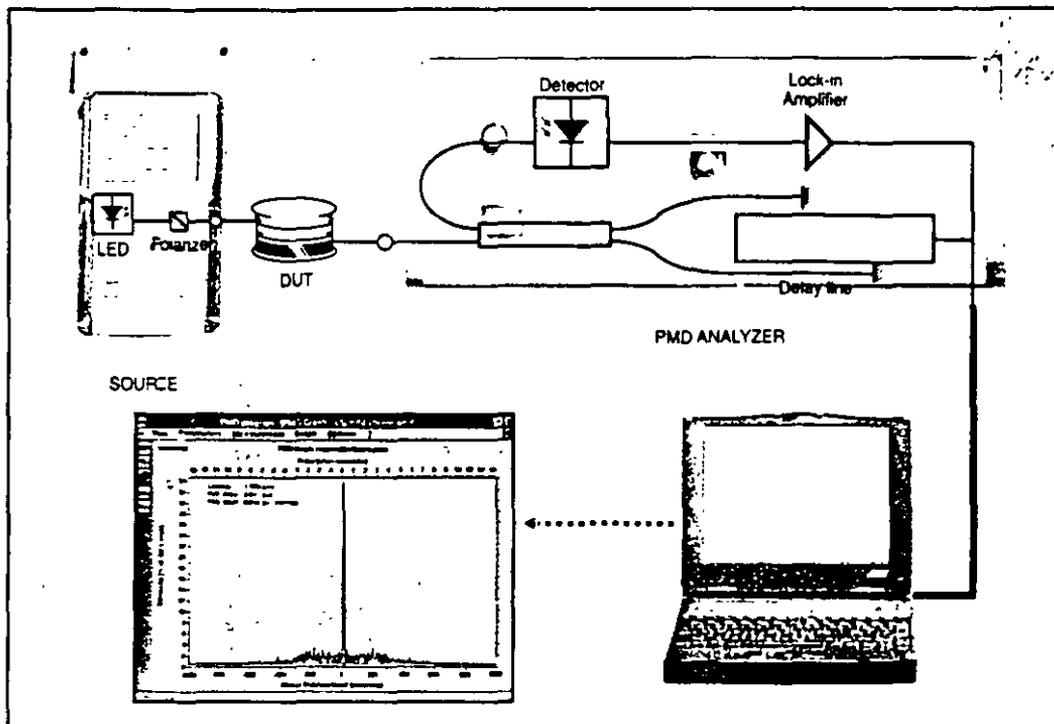
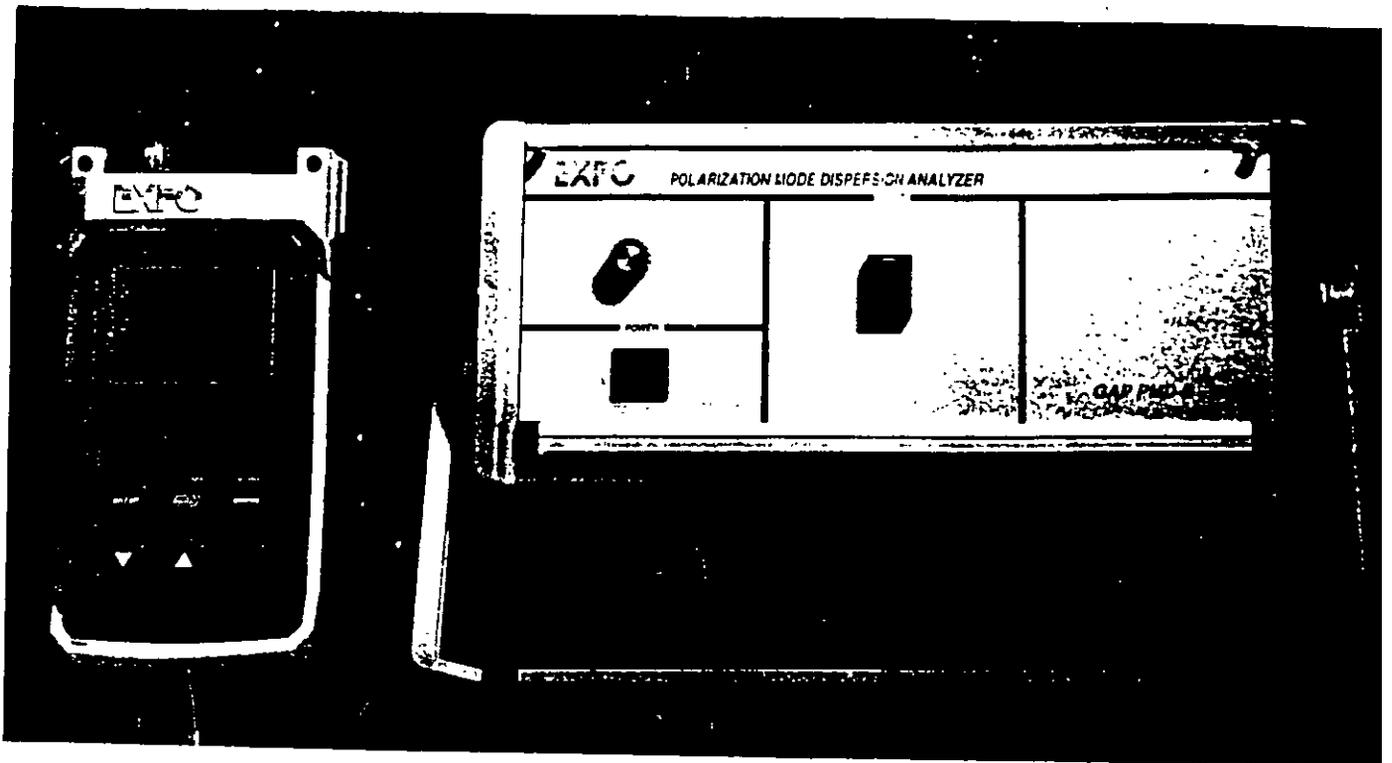


Figura 5.- Arreglo para medir PMD

#### Características principales del equipo GAP PMD II de EXFO para medir PMD

- Portátil y resistente a la vibración .
- Rango dinámico alto 40dB.
- Tiempo de medición corto <15 s .
- Gran capacidad de medición de valores PMD 0.06 ps a 100 ps.
- Excelente repetibilidad  $\pm 0.05$  ps.
- Operación automática fácil y flexible.



**• PMD ANALYSER • EXFO E.O. ENGINEERING 10/04/1996 2.97**

Page 1

Files : c:/pmdwin97/\*.pmd  
Operator : EXFO

Num	Name	PMD Delay [ps]	PMD Coef. [ps/Km <sup>1/2</sup> ]	Length [m]	Cable name
1	tst36f1	3.96	0.705	31480.00	PMD test of link1
2	tst36f2	3.97	0.708	31480.00	PMD test of link2
3	tst36f3	3.84	0.685	31480.00	PMD test of link3
4	tst36f4	3.97	0.708	31480.00	PMD test of link4
5	tst36f5	3.87	0.690	31480.00	PMD test of link5
6	tst36f6	3.85	0.685	31480.00	PMD test of link6
7	tst36f7	3.95	0.704	31480.00	PMD test of link7
8	tst36f8	4.11	0.732	31480.00	PMD test of link8
9	tst36f9	3.97	0.707	31480.00	PMD test of link9
10	tst36f10	4.12	0.734	31480.00	PMD test of link10

Figura 6.-Equipo para medir PMD y resultados obtenidos.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**TRANSMISORES ÓPTICOS**

**CONFERENCISTA  
DR. HORACIO SOTO RODRÍGUEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



## INTRODUCCIÓN

- El emisor de luz es un elemento clave en todo sistema de fibras ópticas.
- Su selección depende de la aplicación específica.
- Su función fundamental es convertir la señal eléctrica que porta la información en una señal óptica.

### Selección de la fuente

Deben tomarse en cuenta las características de la fibra tales como:

- Atenuación como función de la longitud de onda ópticas.
- Distorsión por retraso de grupo (ancho de banda)
- Su geometría (tamaño)
- Características Modales.

### Fuentes Ideales

- Configuración y tamaño compatibles con las dimensiones de las fibras ópticas.
- Long. de onda de emisión donde la fibra tiene pérdidas bajas.
- Modulación simple y ancho de banda amplio .
- Altamente lineal para evitar distorsión .
- Bajo costo y durabilidad .



## Fotoemisores

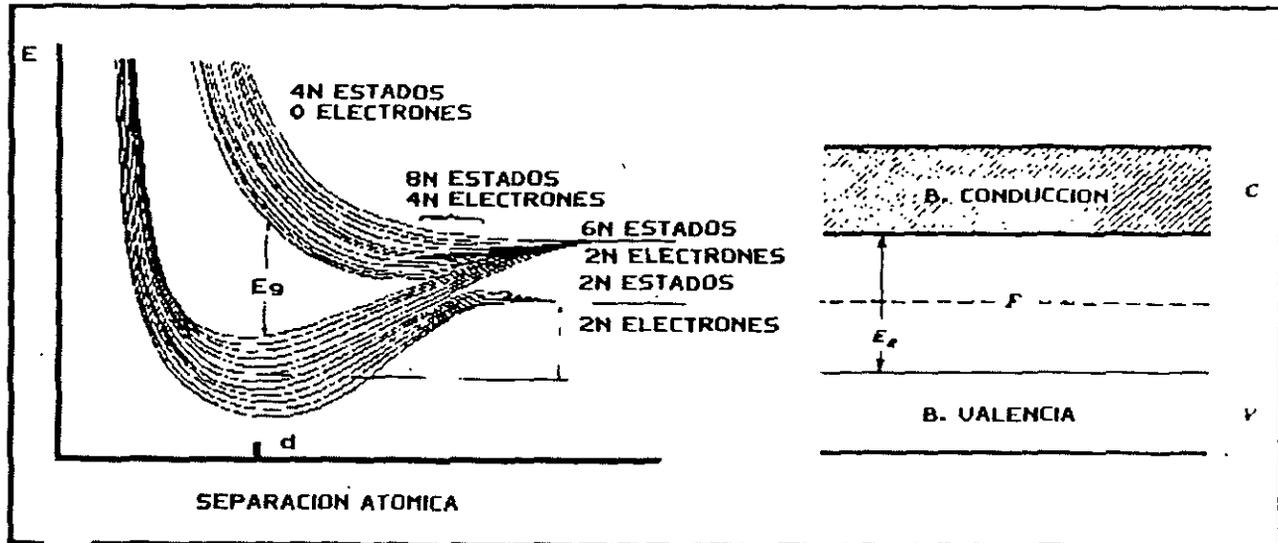
Los sistemas de fibra óptica usan como principales fuentes a:

- \* El diodo emisor de luz (LE D)
- y \* El diodo láser (LD)
- Estos dispositivos son de material semiconductor .
- Sus características son las más compatibles can la fibra óptica.

**¿COMO PRODUCE  
LUZ UN  
SEMICONDUCTOR?**

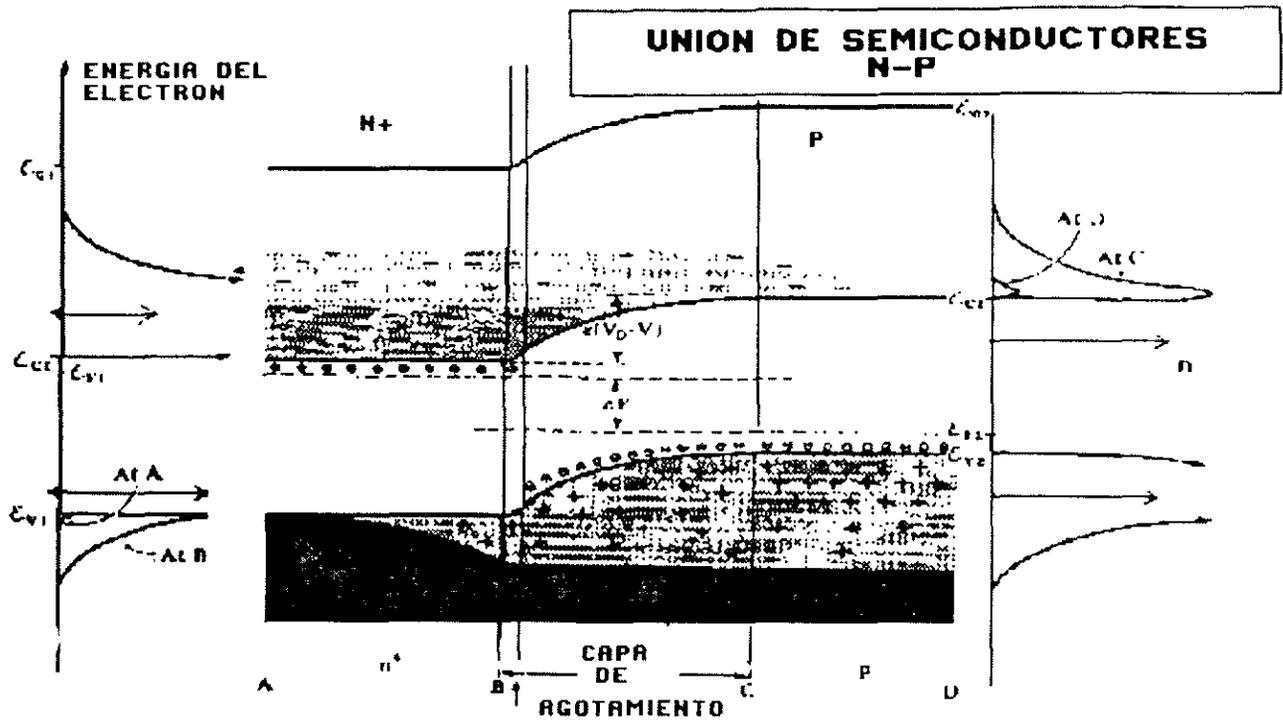


## FORMACION DE BANDAS DE ENERGIA EN UN SOLIDO



### Inyección de portadores

- La operación de un semiconductor está esencialmente basado en la inyección y extracción de portadores.
- Esto puede lograrse formando una unión de semiconductores tipo P y N
- Si la unión es polarizada directamente la barrera de potencial en la región de contacto permitiendo la recombinación de portadores

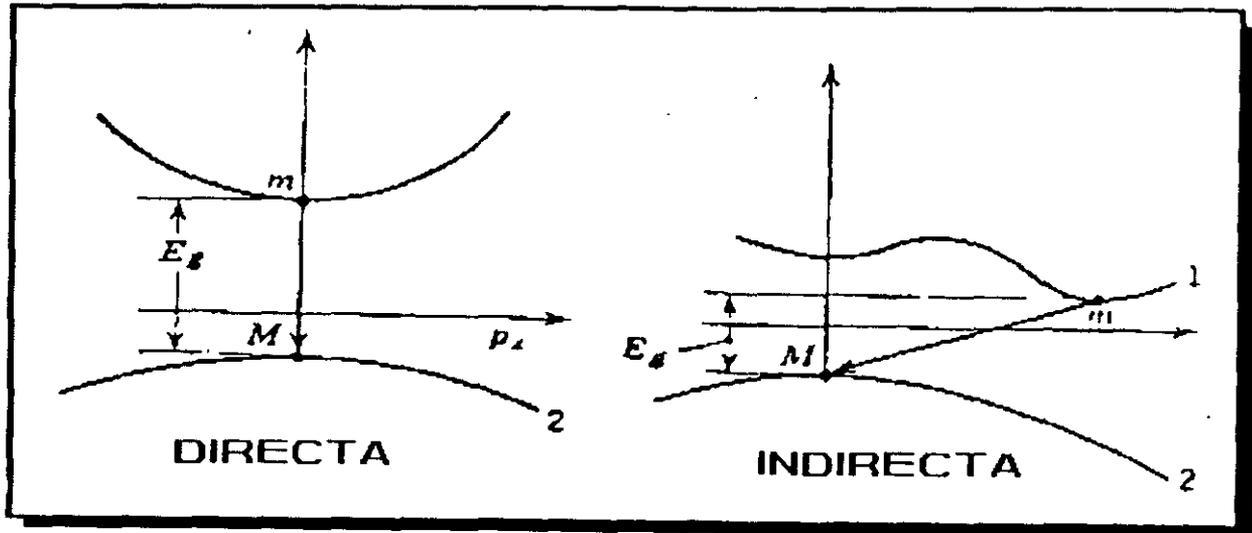


### Producción de luz

- El proceso de recombinación más simple es aquel en el que el electrón y el hueco tiene el mismo valor de momento .
- La emisión o absorción de un fotón solo se produce si se conserva la energía y el momento de la partícula.
- Esto da origen a dos tipos de transiciones radiativas: directas e Indirectas.



## TRANSICIONES



### Materiales que emiten luz

- La combinación de elementos de la tabla periódica de los grupos III y V produce compuestos con las propiedades de electroluminescencia.
- Los compuestos más comunes para fabricar estos dispositivos son:

GaAs y GaAsAl	800 a 900 nm
InP y InPGa	930 a 1700 nm.

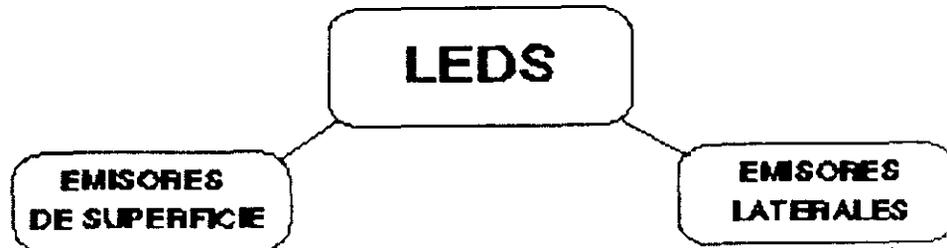


## Diodo emisor de luz

- El LED emite fotones mediante un mecanismo de emisión espontánea.
- Es una fuente de luz incoherente porque los fotones que resultan de esta operación tienen fases aleatorias .

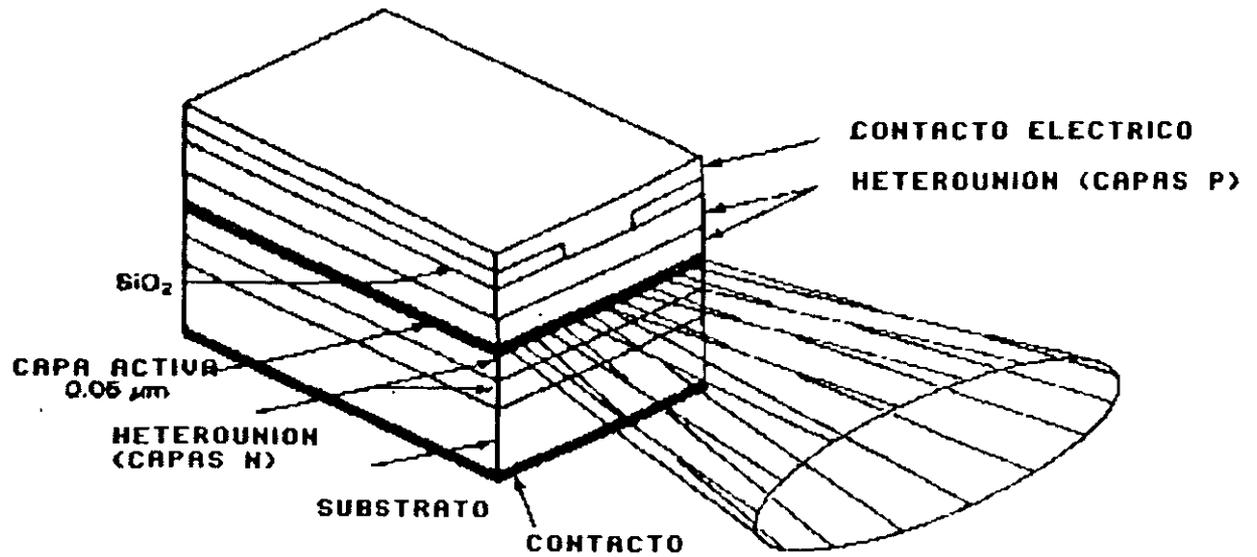
## Principales estructuras

- A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas estructuras para mejorar las características del led.



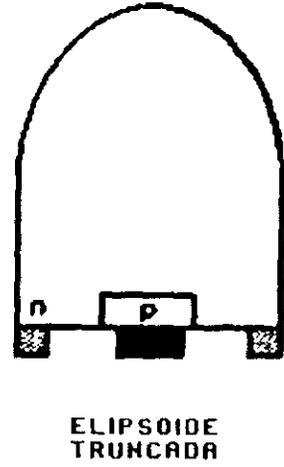
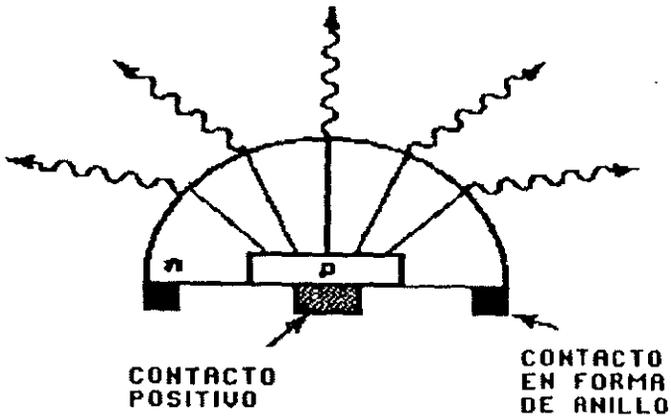


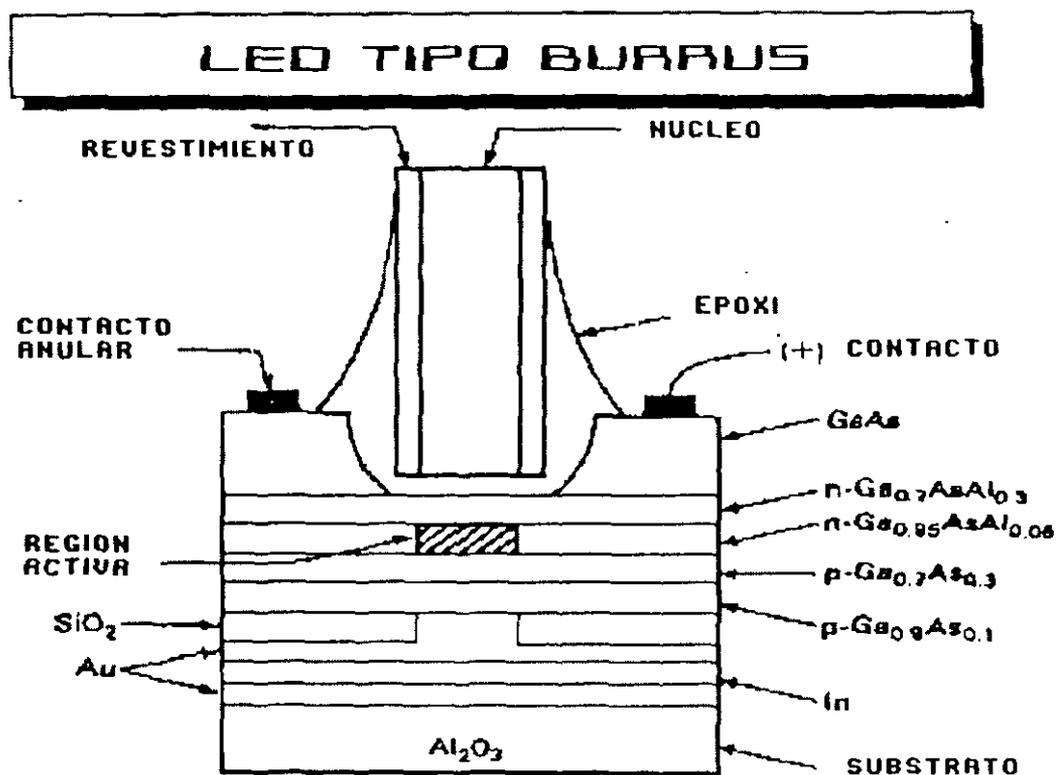
## LED EMISOR DE EXTREMO





# ESTRUCTURAS DE LEDS TIPO DOMO





### Características Principales

- Ancho de banda de modulación bajo ( 50 Mhz).
- Ancho espectral óptico grande.
- Baja potencia acoplada en la fibra
- Distorsión armónica en modulación directa.
  - Por esto son fuentes adecuadas para enlaces cortos y de bajas tasas de transmisión
- Son usados con fibras multimodo de índice escalonado o graduado.



### **Ventajas de su uso**

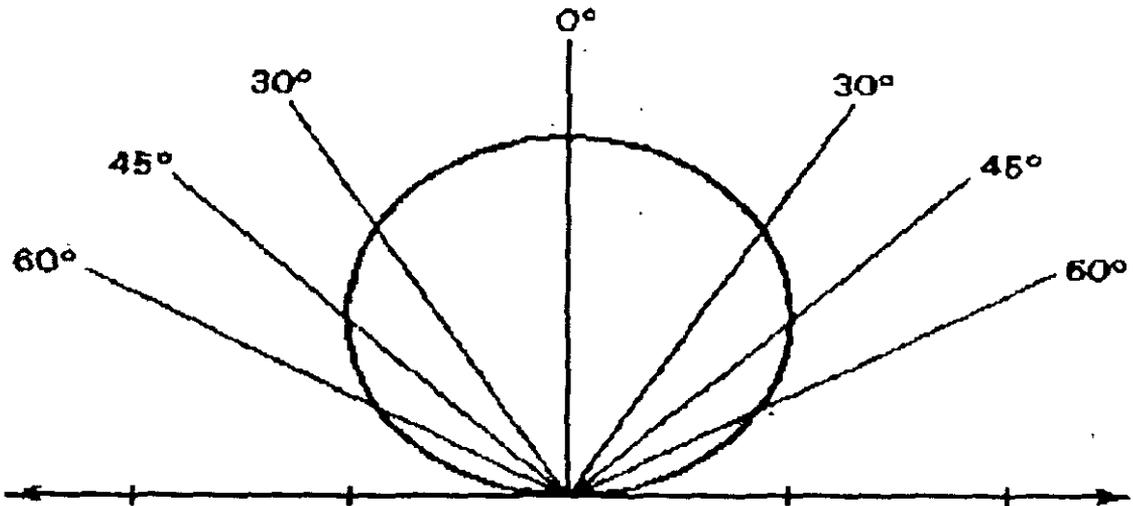
- Las principales ventajas del LED son:
  - Fabricación simple.
  - Linealidad.
  - Costo y duración.
  - Circuitería de manejo simple.
  - Dependencia térmica baja.
- Esto ha hecho del LED una fuente ampliamente usada.

### **Propiedades de los LEDS**

- La potencia emitida tiene una relación casi lineal con la corriente inyectada. (  $I_{max}$  - 100 mA. ) .
- El ancho espectral es típicamente de 30 a 50 nm a 850 nm.
- Su dependencia térmica es de 3 a 4 A/°C
- Su patrón de radiación es lambertiano por lo que su eficiencia de acoplamiento en las fibras es baja.



## PATRON DE RADIACION DE UN LED



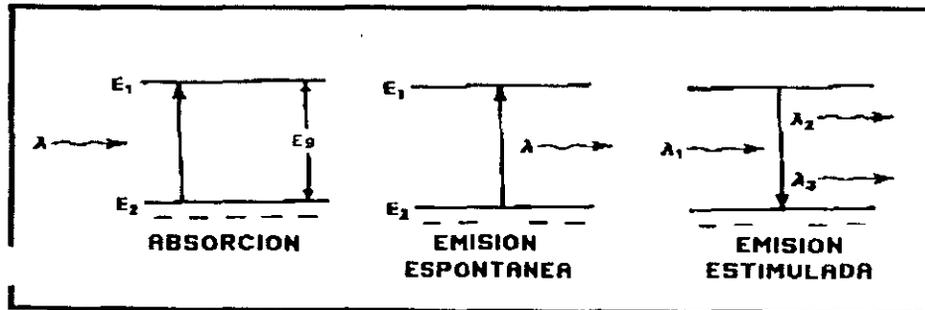
**RADIADOR LAMBERTIANO**

### Diodo Láser

- La palabra LASER significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.
- El láser puede ser descrito por la formación de una onda estacionaria que se amplifica dentro de una cavidad formada por los semiconductores.



## INTERACCION LUZ - MATERIA

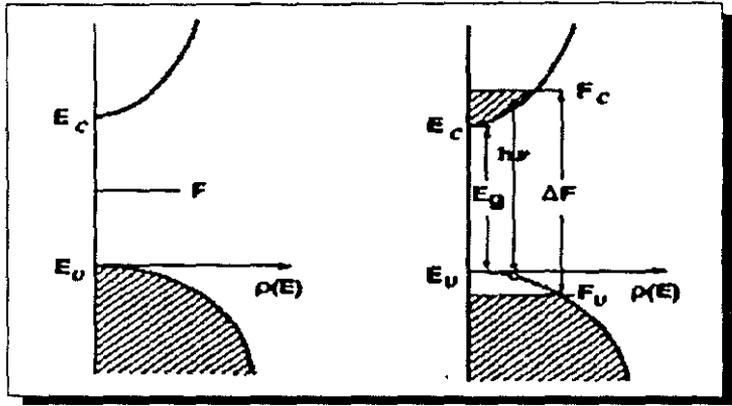


### Retroalimentación

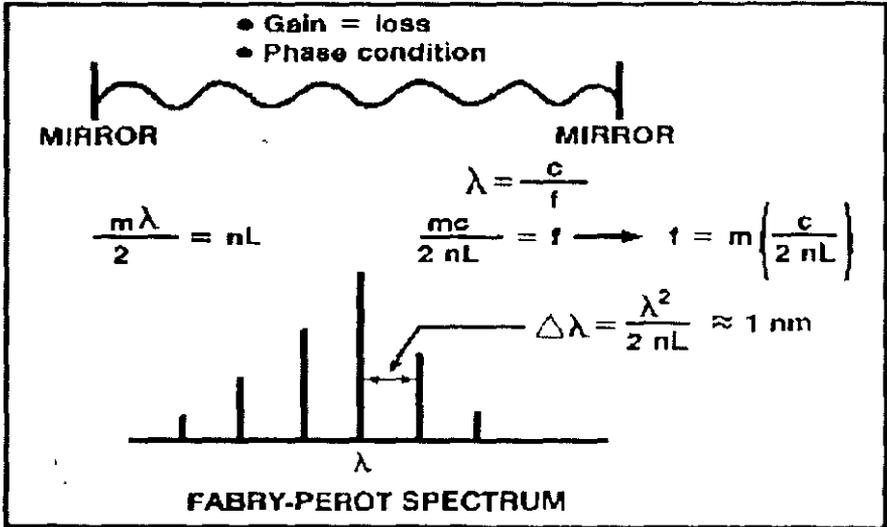
- Para que la emisión estimulada sea mayor que los demás procesos es necesario que exista una inversión de población .
- La ganancia dentro del material tiene que ser igual por lo menos a las pérdidas por lo que la señal óptica se retroalimenta mediante la formación de una cavidad resonante en la capa activa.



### INVERSION DE POBLACION

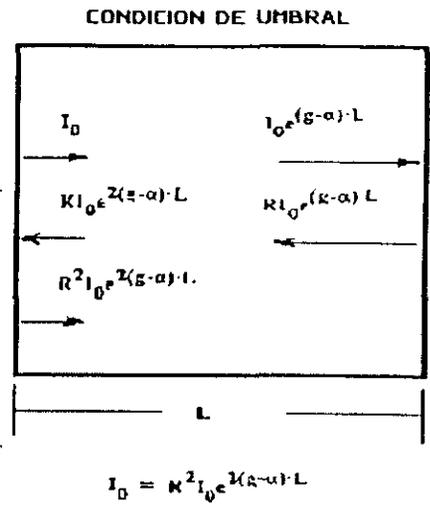
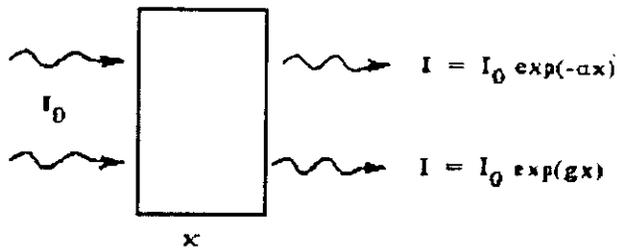


### CONDICION DE OSCILACION

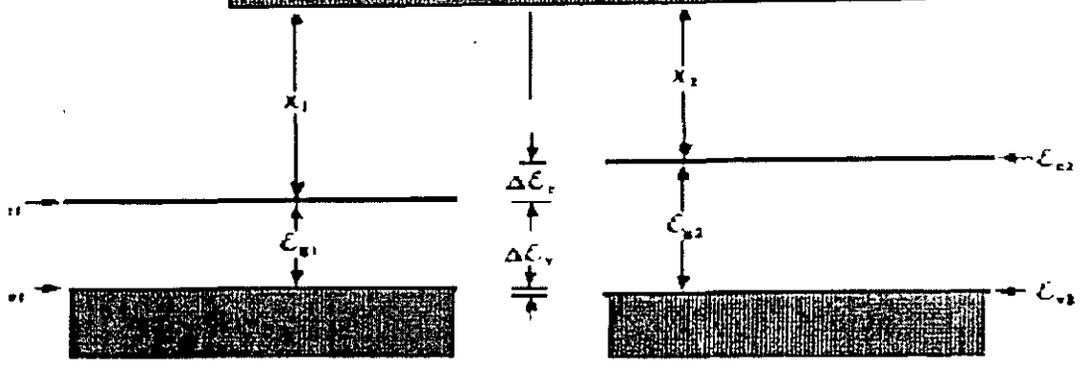




# ABSORCION Y GANANCIA



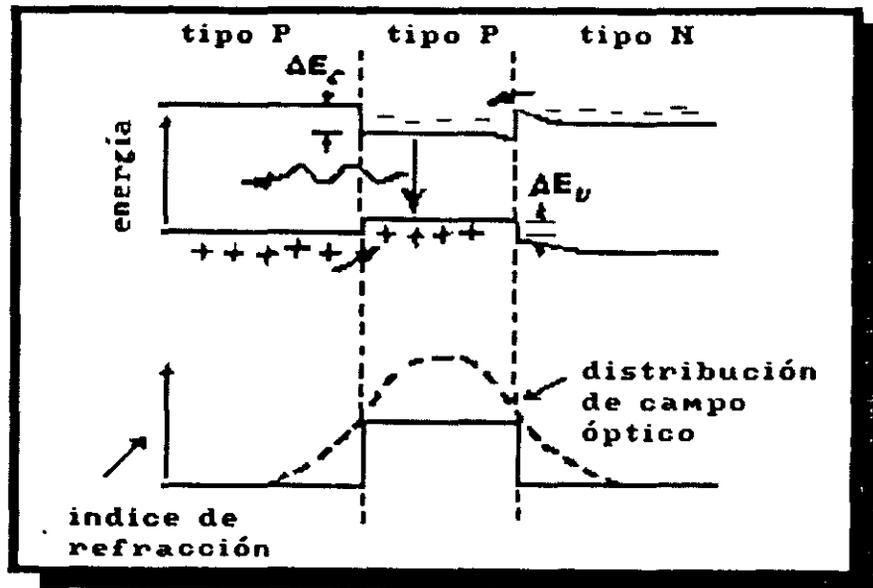
# HETEROUNIONES



NIVELES DE ENERGIA PARA DOS SEMICONDUCTORES DOPADOS DIFERENTE

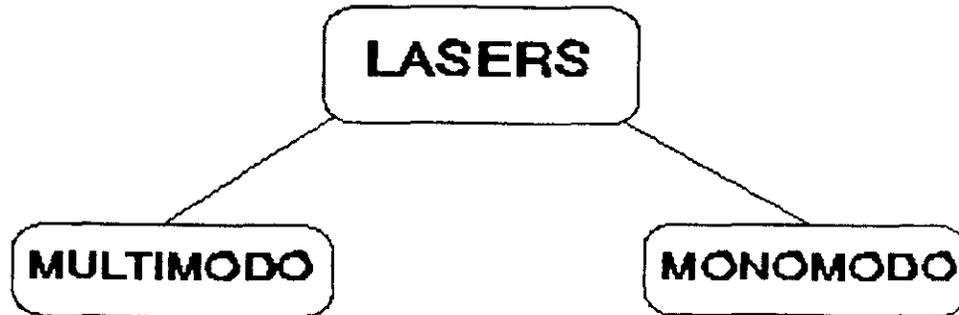


# DOBLE HETEROUNION



## Clasificación

- Por sus características de oscilación, los láser pueden clasificarse en:

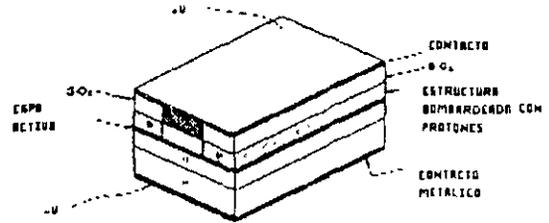


### Estructuras

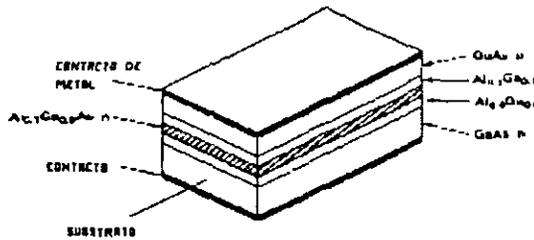
- Una gran cantidad de estructuras han surgido como resultado de las investigaciones realizadas sobre el láser de semiconductor .
- Las principales estructuras desarrolladas para lasers fabry-perot son:
  - Ganancia aulada.
  - Indice guiado.



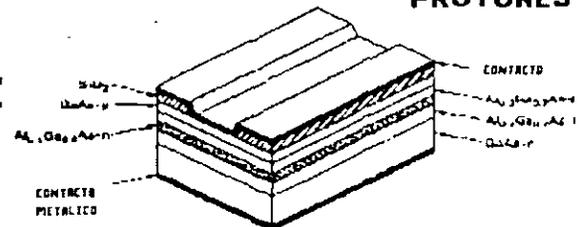
**ESTRUCTURAS DE LASERS**  
**GANANCIA GUIADA**



**FRANJA BOMBARDEADA CON PROTONES**

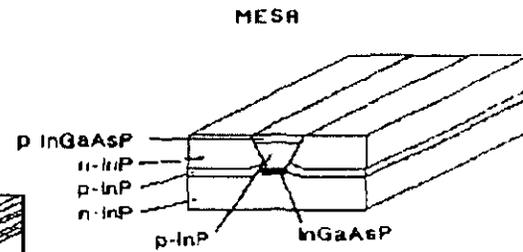


**AREA AMPLIA**

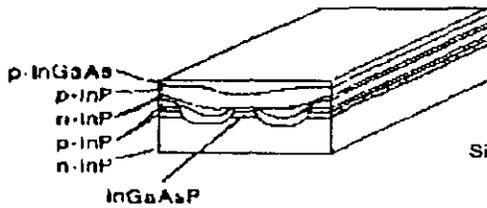


**FRANJA DE CONTACTO**

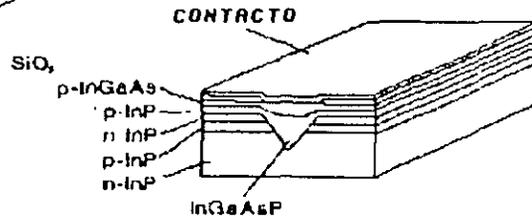
**ESTRUCTURAS DE LASERS**  
**INDICE GUIADO**



**MESA**



**DOBLE CANAL**



**SUBSTRATO EN U**

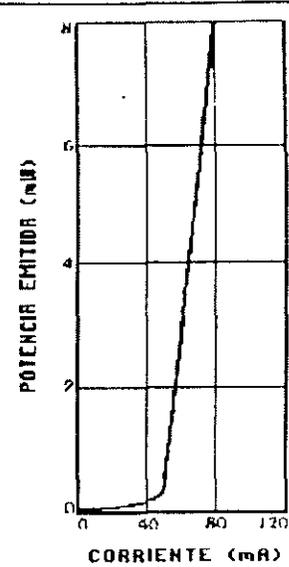


## CARACTERISTICAS DEL DIODO LASER

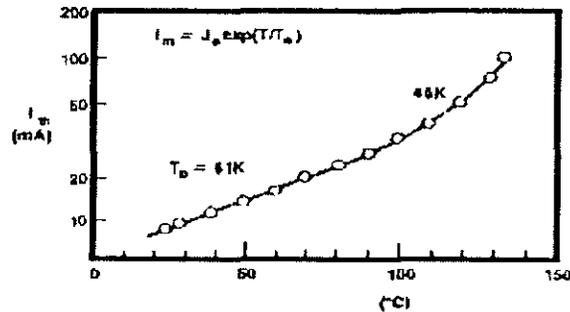
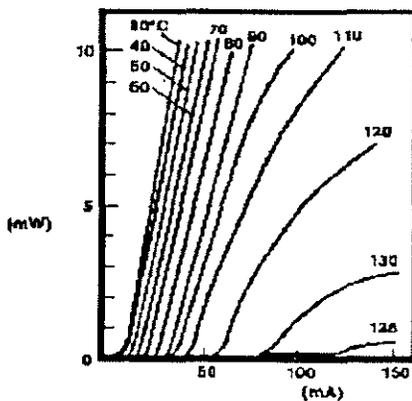
EL LASER TIENE UN NIVEL DE UMBRAL A PARTIR DEL CUAL SU POTENCIA SE INCREMENTA RAPIDAMENTE CON LA VARIACION EN LA CORRIENTE.

SU CORRIMIENTO DEL NIVEL DE UMBRAL TIPICO CON LA TEMPERATURA ES DE:

$$8.5 \text{ mA} / ^\circ\text{C}$$



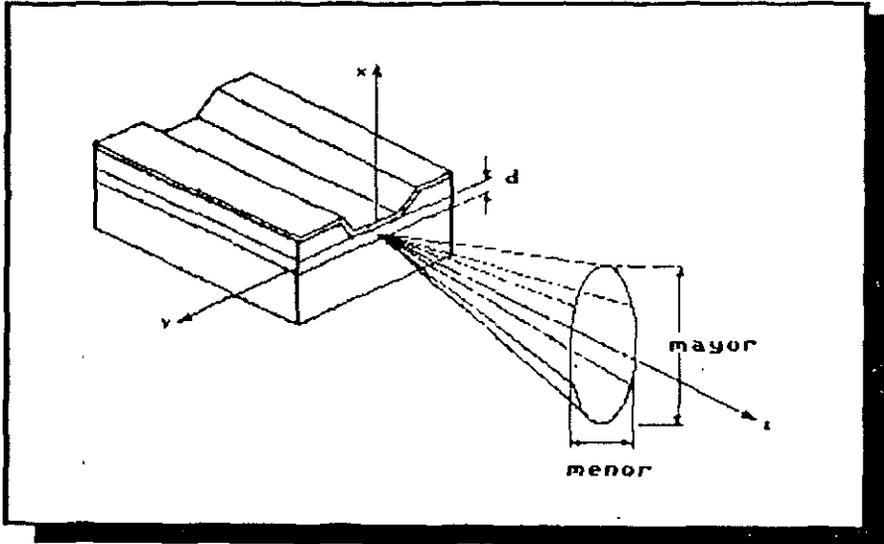
## DEPENDENCIA TERMICA DEL UMBRAL



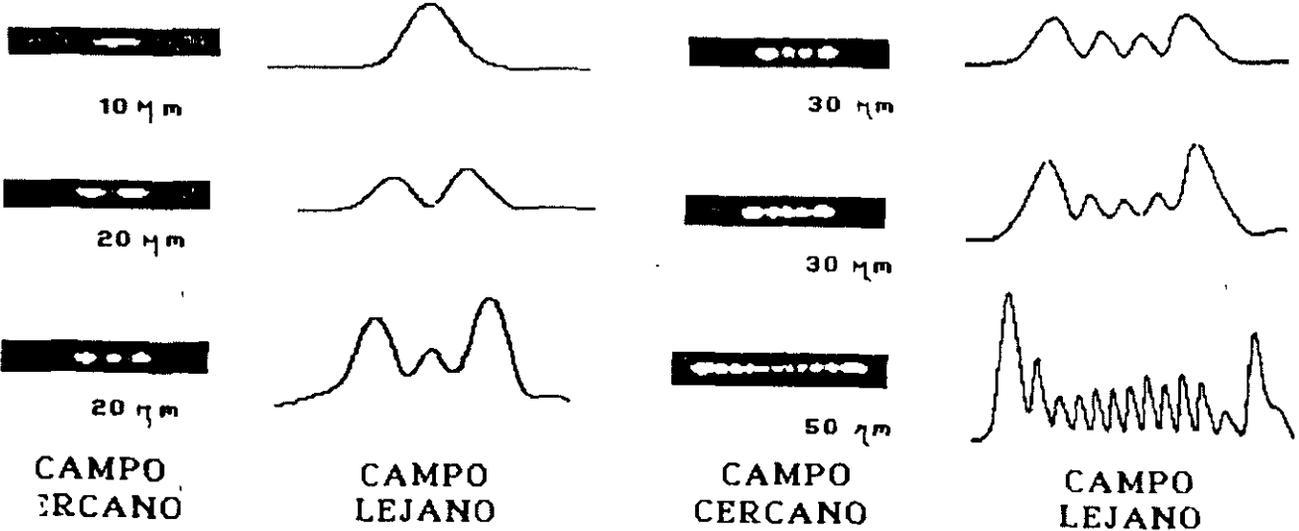
- REQUIERE DE UN FOTODETECTOR EN LA CARA POSTERIOR Y UN CIRCUITO DE CONTROL.
- UN TERMISTOR Y UN CIRCUITO DE CONTROL.



## EMISION NO LAMBERTIANA

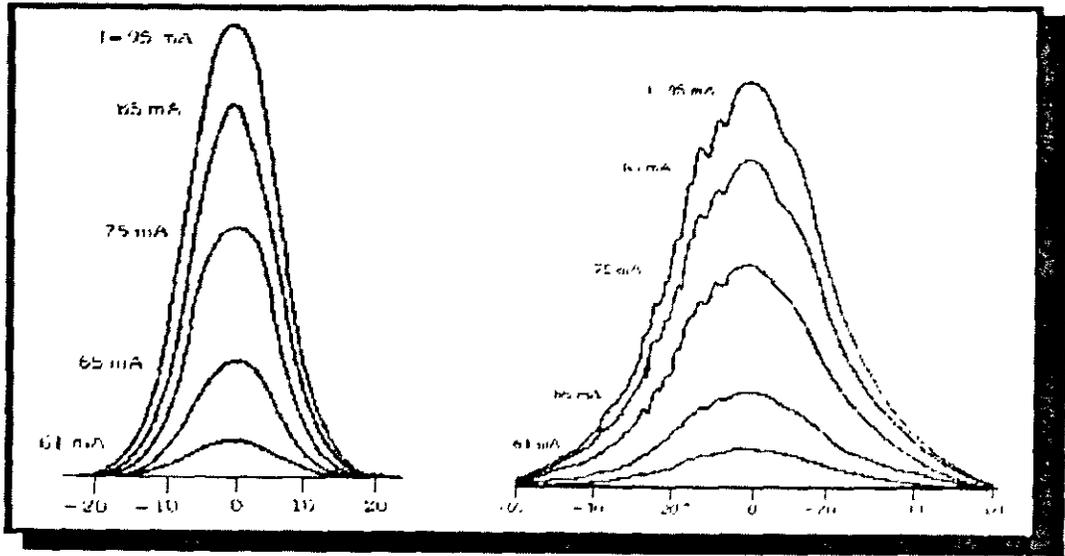


## PATRON DE RADIACION DEL LASER CAMPO CERCANO Y LEJANO

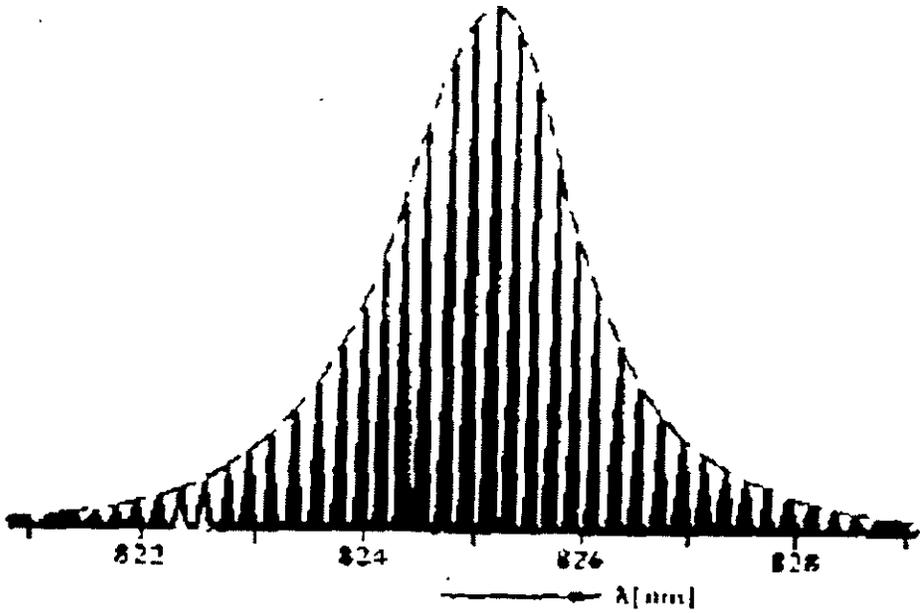




## PATRON DE RADIACION DE UN LASER

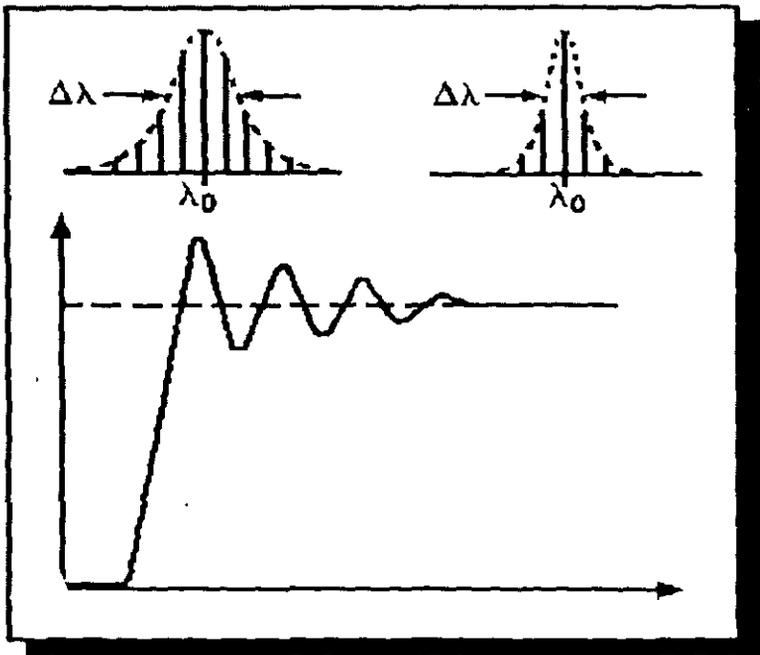
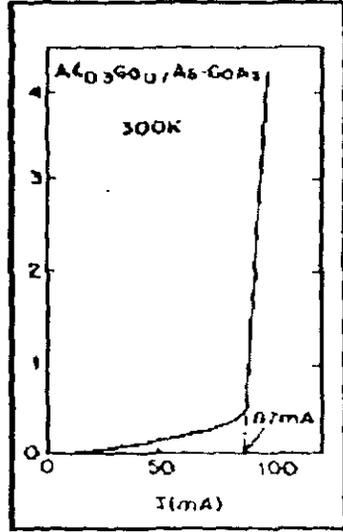
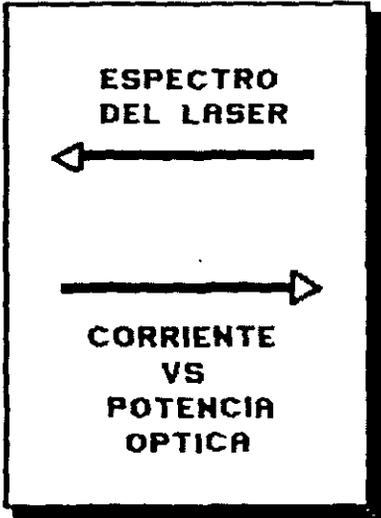
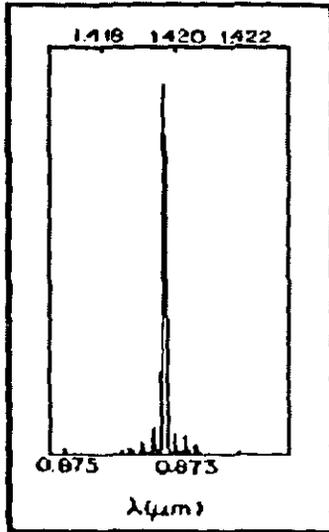


## ESPECTRO DEL LASER MULTIMODO





### CARACTERISTICAS DE UN LASER MONOMODO

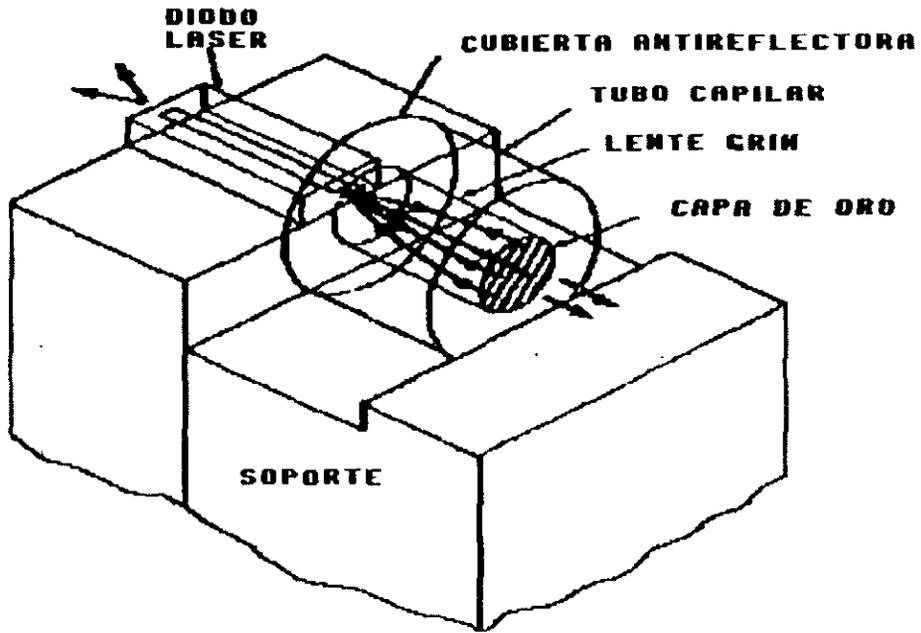


### ESPECTRO DINAMICO DE UN LASER MULTIMODO

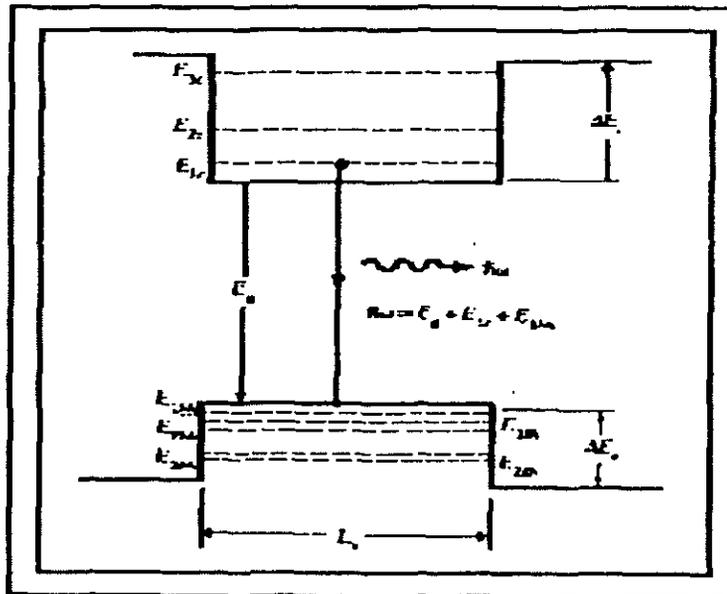
- CONSECUENCIAS:
- ENSANCHAMIENTO DEL ANCHO ESPECTRAL A ALTAS TASAS DE TRANSMISION.
  - LIMITE POR DISPERSION
  - RUIDO POR PARTICION MODAL



## LASER DE CAVIDAD EXTERNA

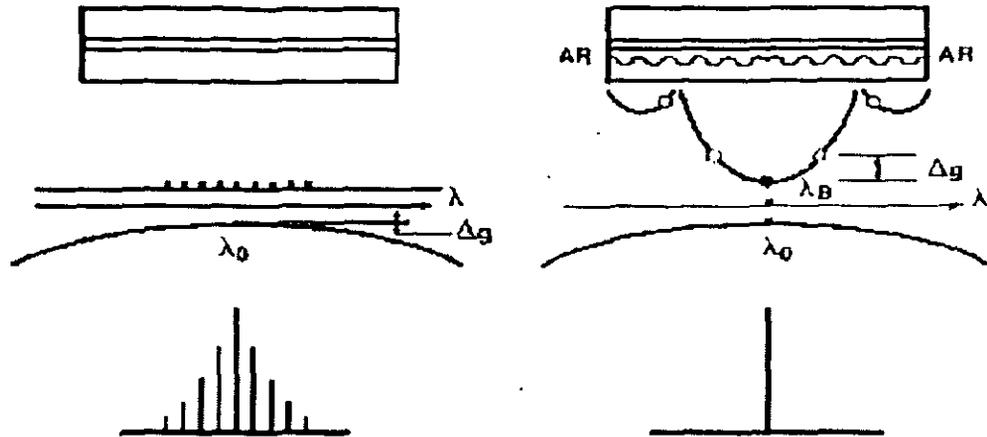


## LASER DE PARED CUANTICA

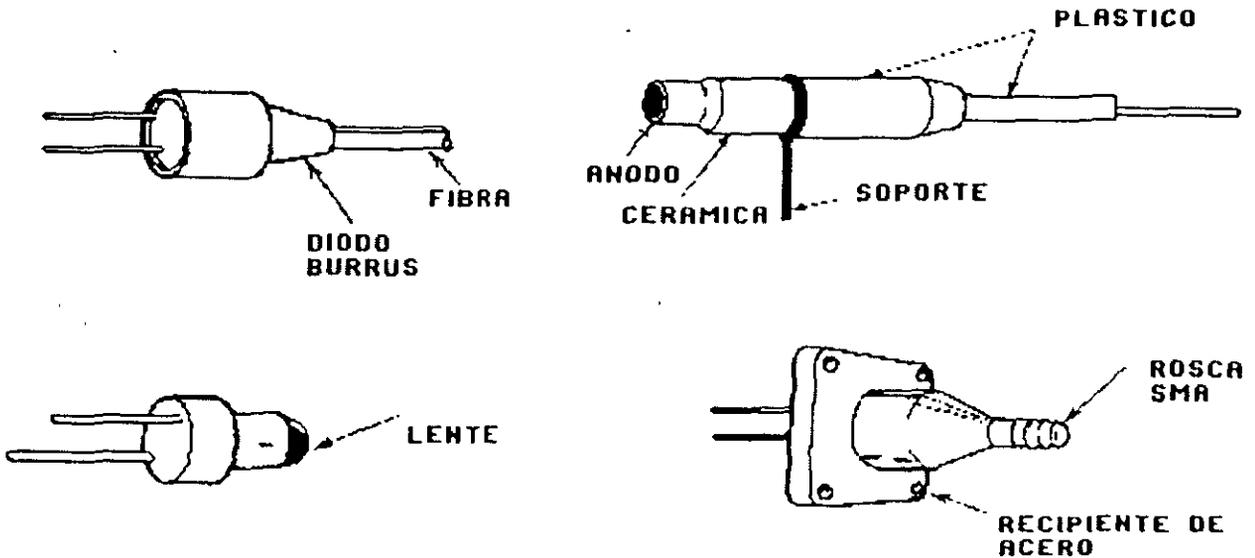




# LASER DFB



# PRESENTACIONES COMERCIALES





## FOTOEMISORES DE SEMICONDUCTOR

Las principales fuentes luminosas usadas en comunicaciones por fibra óptica son:

- Diodo emisor de luz (LED)
- Diodo láser (LD)

Estos dispositivos semiconductores son adecuados para sistemas de transmisión por fibra óptica, a causa de que sus características los hacen ser compatibles con ellos.

Para escoger una fuente luminosa adecuada, las características de la fibra tales como:

- su geometría (tamaño)
- su atenuación como función de  $\lambda$
- distorsión por retraso de grupo (ancho de banda)
- características modales

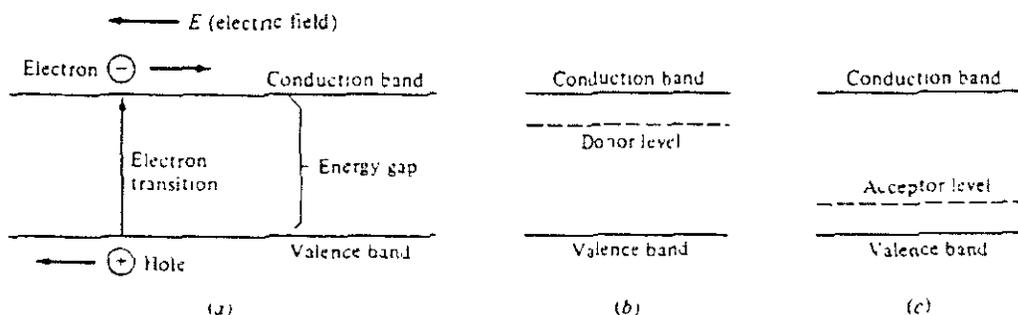
y la interrelación de estos factores con los de las fuentes luminosas tales como:

- potencia óptica
- ancho espectral
- patrón de radiación
- capacidad de modulación

necesitan ser considerados, por lo que se hace necesario analizar las características de salida y de operación de estas fuentes luminosas

¿Cómo se produce luz en un semiconductor?

Un material semiconductor tiene propiedades intermedias entre un metal y un aislante (elementos del grupo IV).





**Fig. 1 Diagrama de bandas de energía**

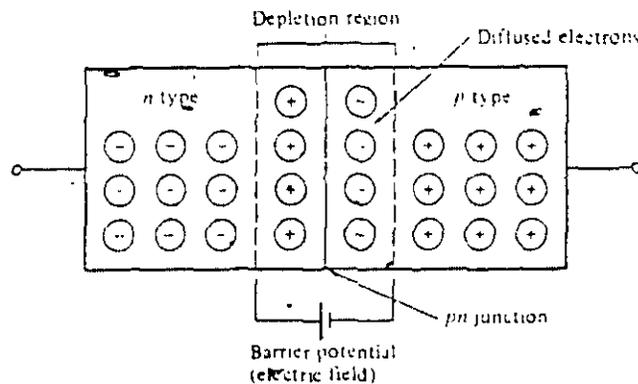
Observando el diagrama de bandas de energía de la Figura 1, podemos interpretar estas propiedades dado que en este tipo de material, cuando son puros y están a temperaturas de  $0^{\circ}\text{K}$  la banda de conducción (nivel superior) está completamente vacía y la banda de valencia (nivel inferior) está completamente llena. Estando separadas por una diferencia de energía que recibe el nombre de banda prohibida, ya que en ella no existen niveles energéticos que puedan ser ocupados y que además no es muy grande, permitiendo de esta forma que conforme la temperatura aumenta algunos electrones son "excitados" térmicamente a la banda de conducción, permitiendo el flujo de electrones en el material, de una forma parcial.

Por cada electrón excitado a la banda de conducción aparece una vacante en la banda de valencia, que recibe el nombre de "huevo" y que también tiene un comportamiento de partícula por lo que contribuye al flujo de corriente. Dadas éstas características, se puede observar que en un material puro la población de electrones y huecos es la misma, sin embargo la introducción de pequeñas cantidades de "impurezas", modifica esta proporción dando origen a dos tipos de semiconductor:

Semiconductor tipo N: que es aquél en el que las impurezas añadidas tienen un electrón de más y éste está disponible para conducción produciendo un exceso de electrones. En este caso, los electrones resultan ser los portadores mayoritarios.

Semiconductor tipo P: en este material las impurezas añadidas tienen un electrón de menos para el enlace requerido con los demás átomos, con lo que un huevo es heredado por cada uno de ellos, produciendo un exceso de huecos que resultan ser los portadores minoritarios.

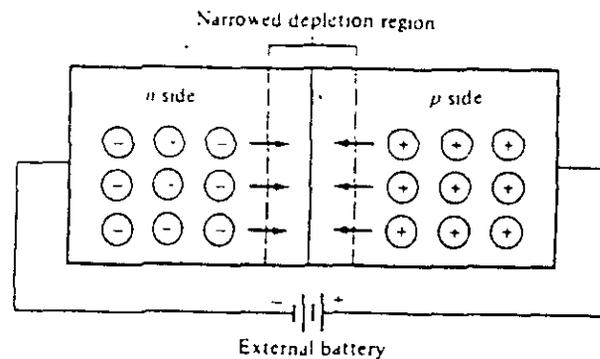
La operación de un dispositivo semiconductor es esencialmente basada en la inyección y extracción de portadores.





**Fig. 2 Unión PN**

Cuando un material tipo P y uno tipo N se unen, los portadores mayoritarios de ambos se difunden a través de la unión, produciéndose una recombinación en la región alrededor de la frontera entre ellos, como un resultado aparece un campo eléctrico a través de ella, estableciendo el equilibrio, previniendo el movimiento de las cargas.



**Fig. 3 Unión PN polarizada directamente**

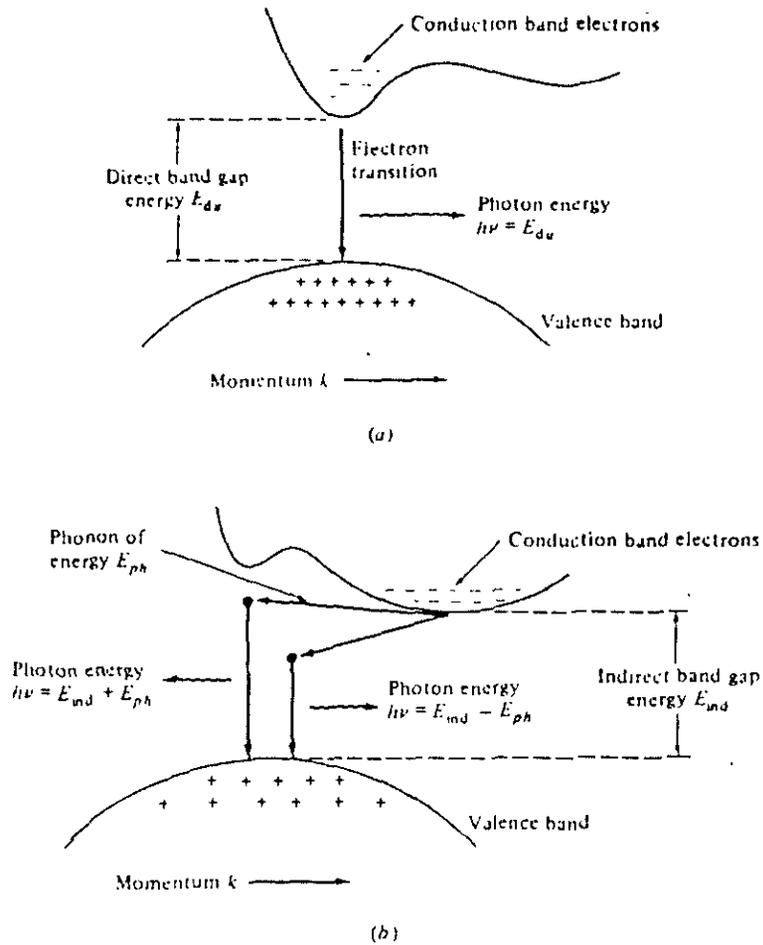
Si la unión PN es polarizada directamente como en la Fig. 3, la barrera de potencial establecida se reduce permitiendo una difusión de los electrones de la banda de conducción del material tipo N hacia los huecos de la banda de valencia del material tipo P.

El proceso de recombinación de portadores toma lugar y la energía del electrón que se recombina puede ser transformada en la emisión de una partícula luminosa de energía  $h\nu = E_g$ , o disiparse en forma de calor, dependiendo del tipo de material semiconductor con el que esté hecha la unión y del tipo de transición realizada.

La emisión o absorción de un fotón, se produce sólo si se conserva la energía y el momento de la partícula. Esto da origen a dos tipos de transiciones radioactivas que dependen de la forma de la función de energía con el momento de la partícula, como se muestra en la figura



4.



**Fig.4 Transiciones directas e indirectas**

El proceso de recombinación mas simple y mas probable es aquél en el que el electrón y el hueco tienen el mismo valor de momento, mientras que en el otro proceso es necesaria la intervención de una tercera partícula llamada "fonón" para que se realice la transición, por lo que se reduce la probabilidad de ocurrencia.

Ya que en un material se presentan, tanto transiciones radioactivas como no radioactivas, los



materiales que pueden generar electroluminiscencia con una eficiencia alta son los de transición directa.

### **Diodo emisor de luz (LED)**

Para sistemas de comunicación que requieren velocidades de transmisión menores o aproximadas a 50 Mb/s, junto con potencias ópticas acopladas en la fibra del orden de décimas de microwatts, los diodos que emiten luz (LED) son usualmente las mejores fuentes escogidas, esto es debido a que requieren de una circuitería de manejo menos compleja, además de ser más baratos.

Para ser útil en estas aplicaciones un LED debe tener:

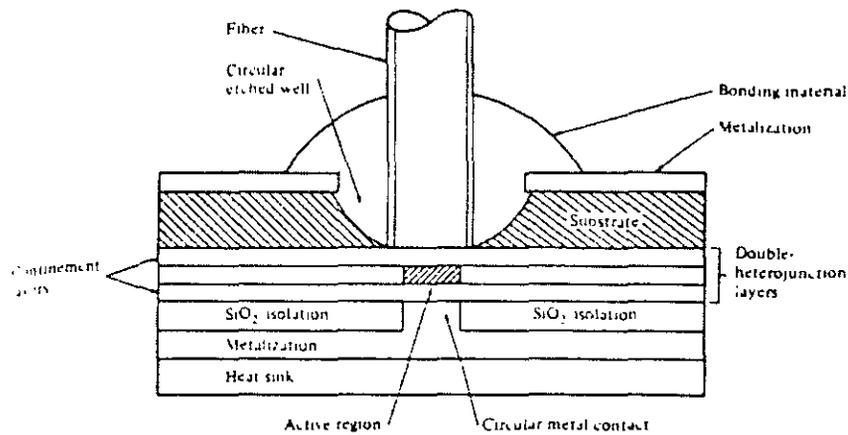
- alta radiancia
- tiempo de respuesta de emisión rápida
- alta eficiencia cuántica

Para lograr estos propósitos, el LED debe proveer un medio de confinamiento óptico y de portadores de carga, generando 2 tipos principales de estructuras:

- diodos emisores de superficie
- diodos emisores laterales

### **Diodo emisor de superficie**

La estructura de un diodo emisor de superficie se muestra en la figura 5, en este diseño se tiene un área de emisión relativamente pequeña de 15 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro sumergida una gran cantidad de material semiconductor la cual ayuda a disipar el calor de manera eficiente, además, la separación de la unión semiconductor respecto a la superficie se hace muy angosta para minimizar las pérdidas de absorción.



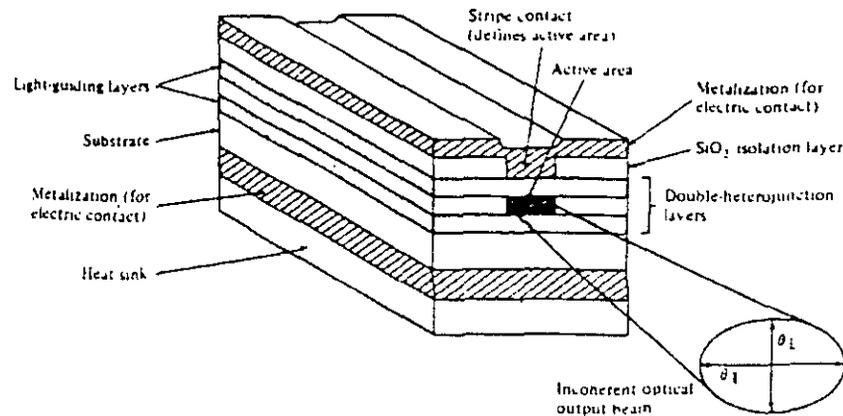
**Fig.5 Diodo emisor de superficie**

La medida de eficiencia de un led es la radiancia definida como la potencia radiante electromagnética por unidad de ángulo sólido y unidad de superficie normal a la dirección considerada, la unidad de esta medida es Watts/Stereoradian.m<sup>2</sup>

El tipo de emisión de luz en los diodos emisores de superficie es aproximadamente Lambertiano, es decir, que la radiancia es constante en todas direcciones aunque en este caso es confinada a un rango de 120° .

### **Diodo emisor lateral**

En este diodo se emplea la doble heteroestructura semiconductor para confinar los portadores y los fotones en una capa activa muy angosta del orden de 500 Å. Estos dispositivos utilizan un espejo en una cara y una cubierta antirreflejante en la otra, con el objeto de aumentar la eficiencia de emisión, la radiancia de este led es varias veces mayor que la del diodo emisor de superficie, pero lo complicado de su geometría hace difícil la disipación de calor. ( Ver Fig. 6).



**Fig. 6 Diodo emisor lateral**

### **Emisor Superluminiscente**

Este led es una gran aproximación al láser de semiconductor, debido a que su geometría de franja forma una cavidad en la que se produce luz por emisión espontánea y un primer paso de amplificación por emisión estimulada.

Las ventajas de este tipo de led son:

- gran cantidad de potencia óptica de salida
- un haz de salida más direccional que el led
- ancho espectral reducido
- no hay corrimiento de umbral como en el láser.

La principal desventaja es que para producir una potencia equivalente a la del láser se necesita una densidad de corriente tres veces mayor a la del láser.

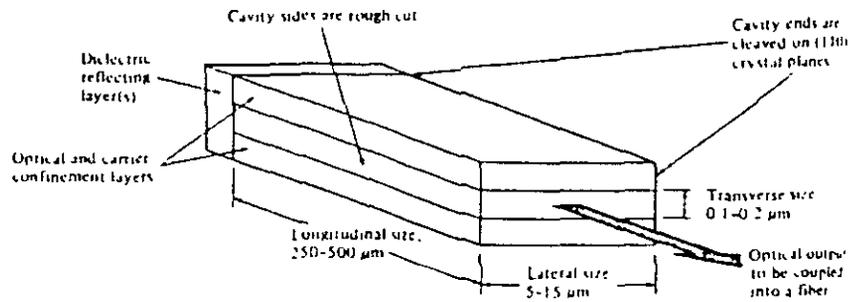
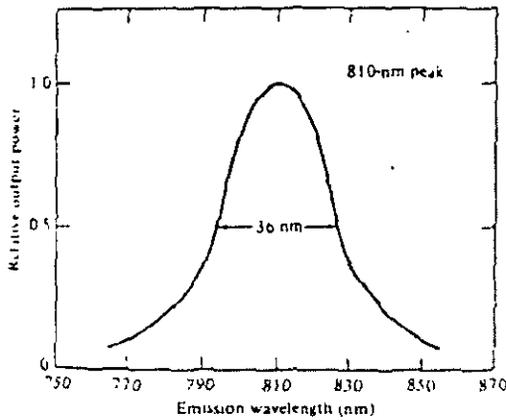


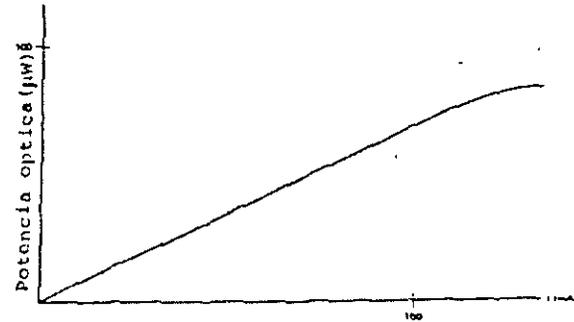
Fig. 7 Diodo Superluminescente.

## CARACTERISTICAS DE LOS LEDS

1. *SALIDA ESPECTRAL.* ; El ancho espectral de la salida de un led a temperatura ambiente en la región de  $0.8$  a  $0.9 \mu\text{m}$  es generalmente de  $350$  a  $500 \text{ \AA}$  en los puntos de  $3 \text{ dB}$ . El corrimiento de la longitud de onda pico con respecto a la temperatura es del orden de  $3$  a  $4 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ .



Salida Espectral del LED



Relación Potencia vs. I

2. EFICIENCIA Y ANCHO DE BANDA DE MODULACION ;La relación entre la potencia óptica de salida de un led y la frecuencia de modulación está dada por:

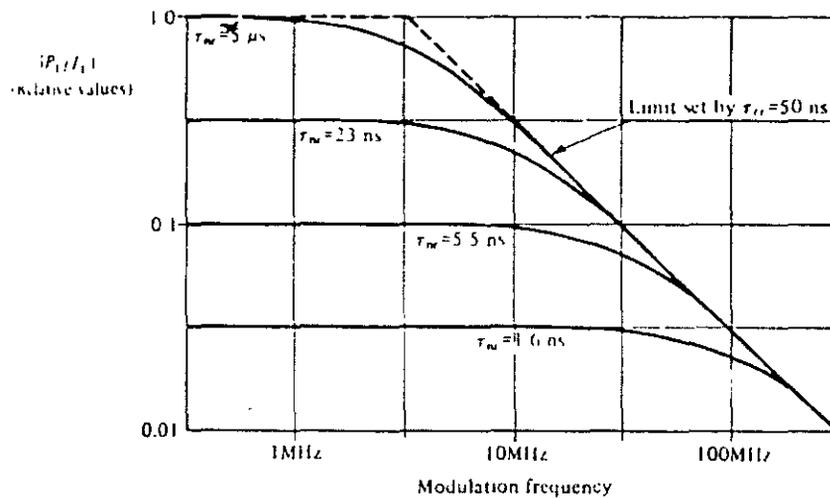
$$P(\omega) = \frac{P(0)}{[1 + (\omega\tau)^2]^{1/2}}$$

donde  $P(\omega)$  = potencia óptica de salida

$P(0)$  = potencia de salida a corriente directa.

$\omega$  frecuencia de modulación

$\tau$  tiempo de vida de los portadores en la región de recombinación



Ancho de Banda de Modulación del LED



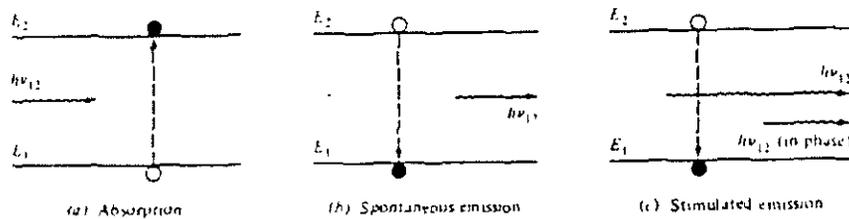
Debe tenerse en cuenta que la capacitancia parásita (10 a 20 pε) introduce un retardo entre la señal de excitación y la respuesta de la unión emisora.

En los resultados para un emisor de superficie de AsGal se observan que altas frecuencias de modulación producen bajas potencias de salida.

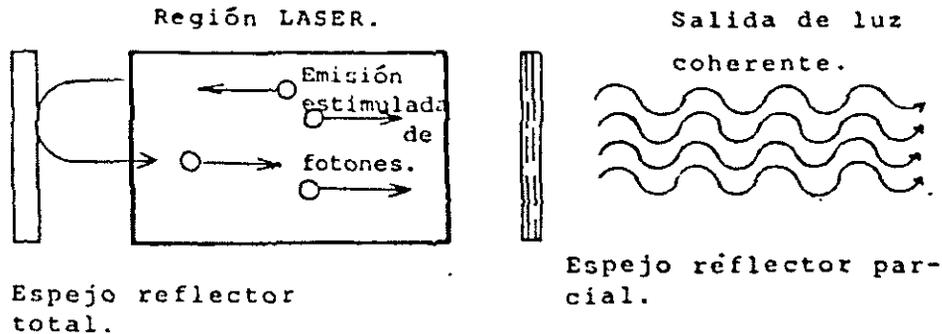
El ancho de banda de modulación se da en términos eléctricos o sea el ancho de banda de 3 dB de la potencia eléctrica detectada.

## DIODO LASER SRMICONDUCTOR

### EMISION ESTIMULADA



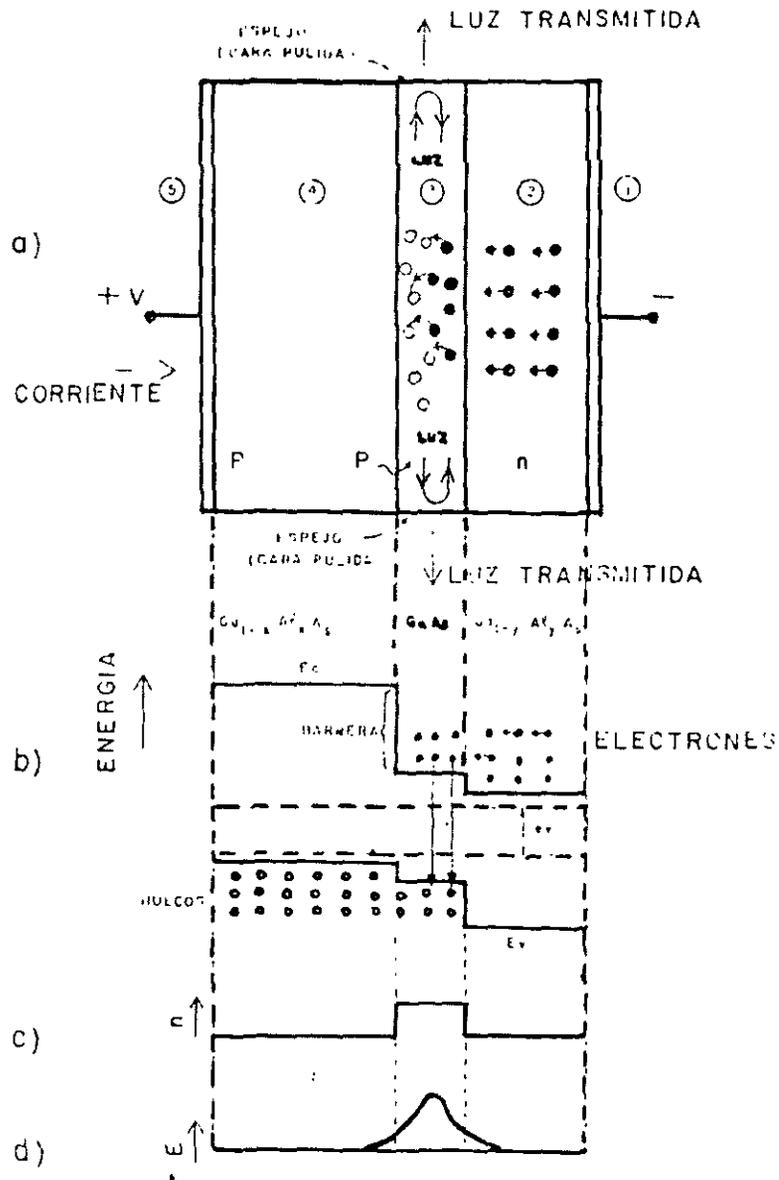
La emisión estimulada se logra por medio de la inversión de población de portadores, una condición en la cual el nivel superior de dos niveles electrónicos separados con una energía  $E = E_2 - E_1$  tiene una probabilidad más alta de ser ocupada por un electrón que el nivel inferior y la probabilidad de que un fotón con energía  $E = h\nu$  induzca una transición electrónica hacia abajo, excederá a la probabilidad de que ocurra una transición electrónica hacia arriba. La amplificación de luz es posible cuando un fotón incidente estimula la emisión de un segundo fotón con una energía aproximadamente a la separación de energía entre los dos niveles electrónicos. Para aumentar la densidad óptica en la región donde se produce el efecto láser se introduce una retroalimentación mediante dos espejos planos y paralelos, formándose de ésta manera una cavidad llamada interferómetro Fabry-Perot, uno de los espejos se hace totalmente reflejante y el otro solo parcialmente y es a través de este último del cual se obtiene la salida de potencia óptica cuyas características son coherencia, alta direccionalidad y alta radiancia.

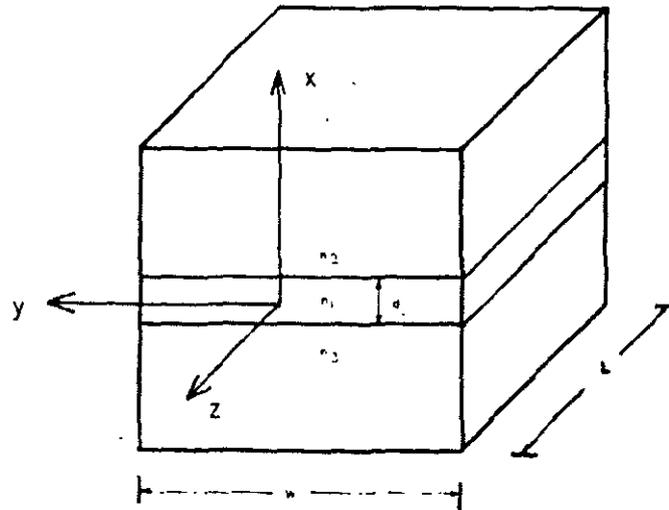


## DIDO LASER SEMICONDUCTOR DE DOBLE HETEROUNION

Se ha comprobado que para reducir las densidades de corriente y permitir de esta manera el efecto láser en operación continua a temperatura ambiente y con tiempos de vida útiles grandes, la unión semiconductor PN del diodo debe construirse de varias capas, cada una ligeramente distinta de la otra, formando las llamadas heterouniones o heteroestructuras, el objetivo de formar heteroestructuras es confinar la luz debido a las diferencias de índice de refracción entre las capas, (ver figura) inyectados a una región de tránsito de los portadores inyectados a una región muy angosta.

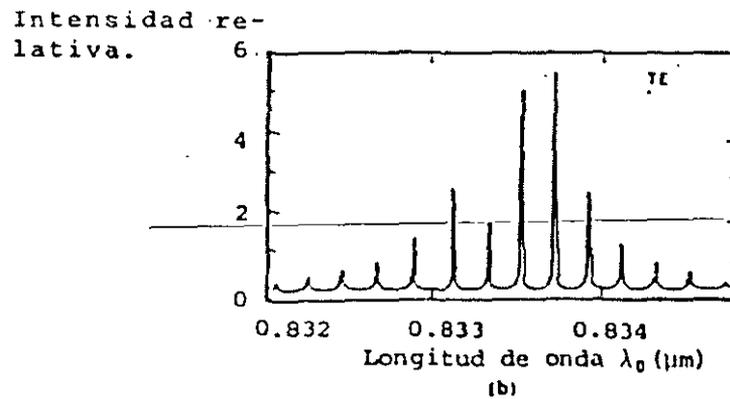
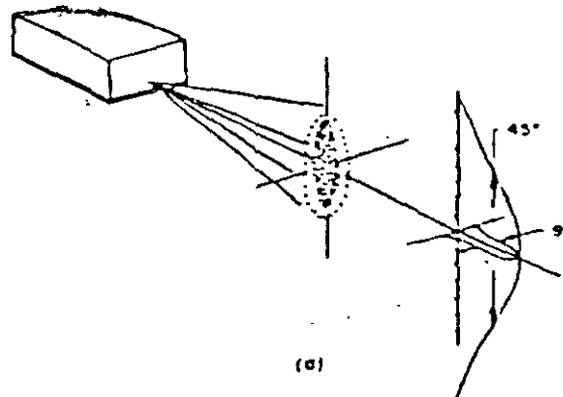
Esto último se logra debido a las diferencias de energía de bandas de las diferentes capas.





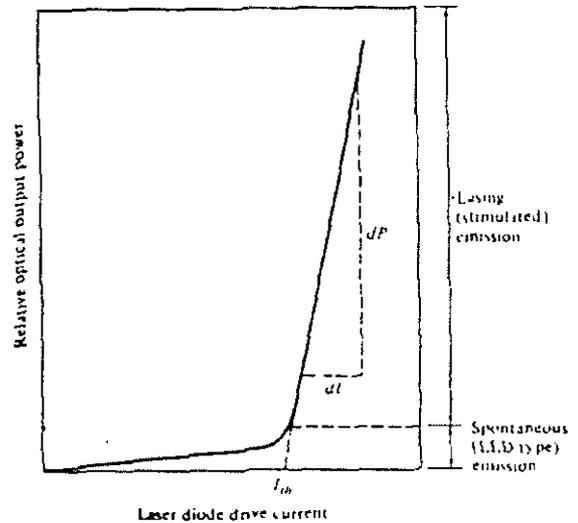
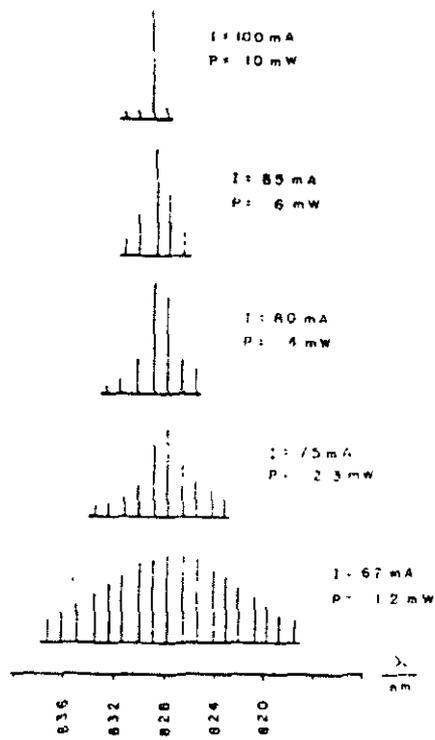
## DIODO LASER DE DOBLE HETEROESTRUCTURA DE GEOMETRIA DE FRANJA

Las propiedades de emisión del láser de geometría de franja se ilustran en la figura. La parte superior de la figura muestra el patrón de emisión de campo lejano, un rayo de emisión típico diverge, para obtener la mitad de la intensidad pico  $45^\circ$  perpendicular al plano de la unión y  $9^\circ$  en el plano paralelo a la unión, la parte baja de la figura ilustra la emisión espectral del láser, la cual no es una línea de longitud de onda única sino una familia de modos longitudinales de la cavidad óptica. Ciertos tipos de láseres de geometría de franja tienen un modo longitudinal único.

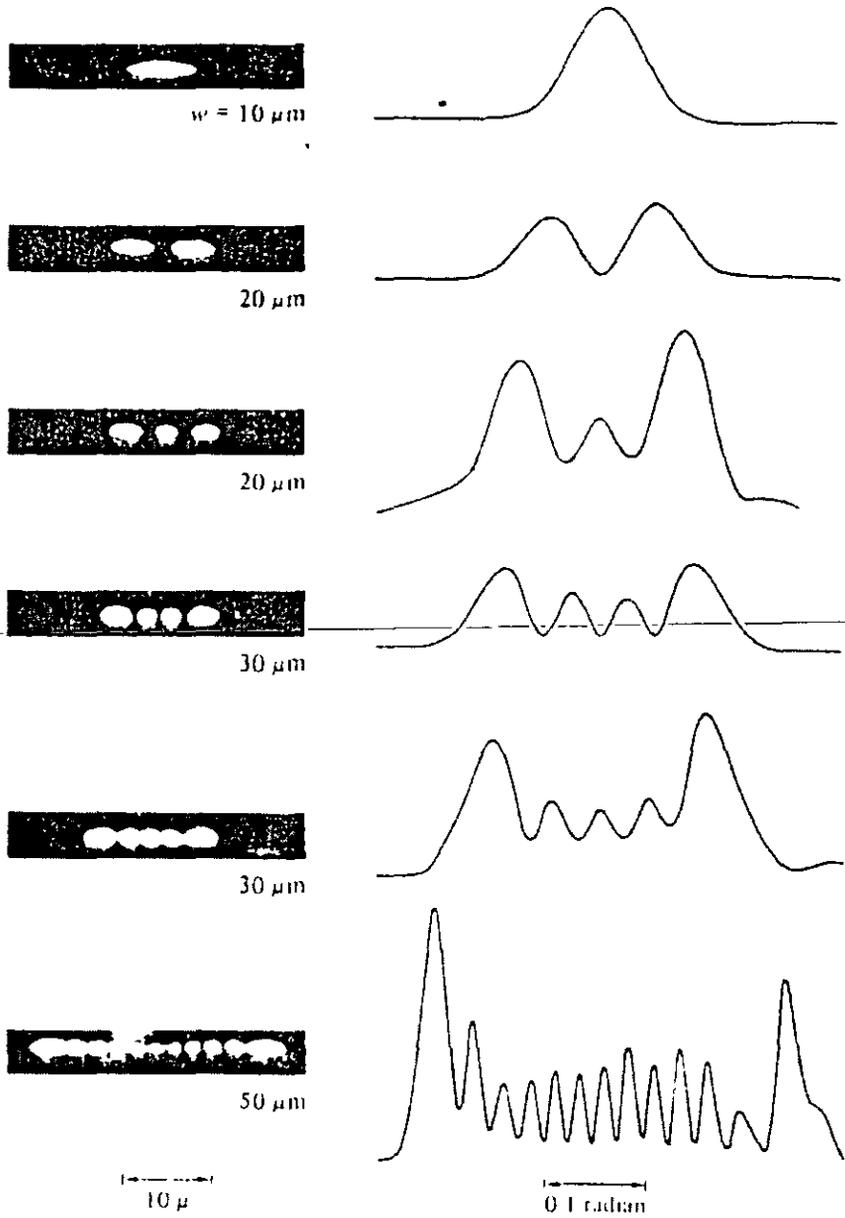


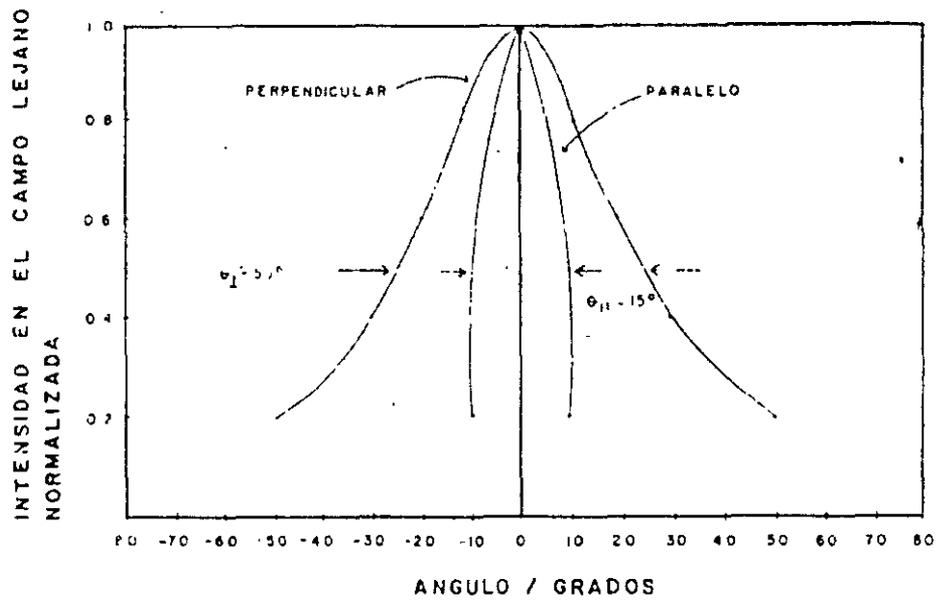
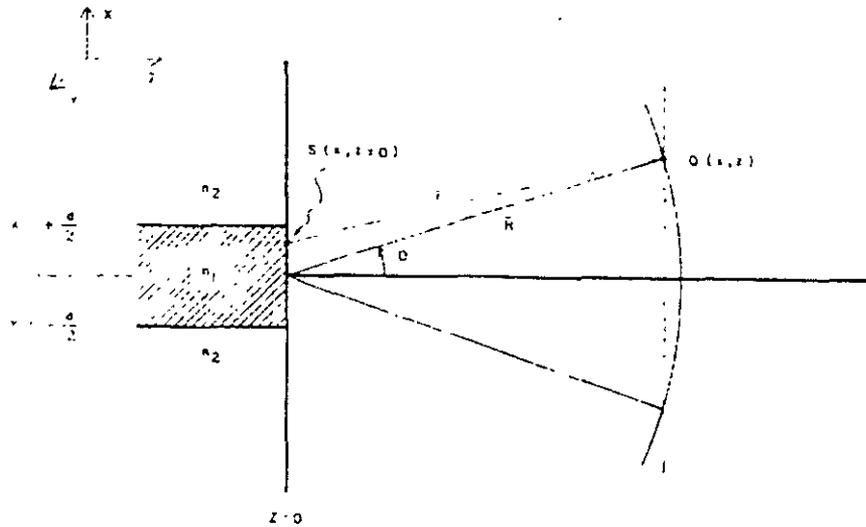
## CARACTERÍSTICAS DE DIODO LÁSER

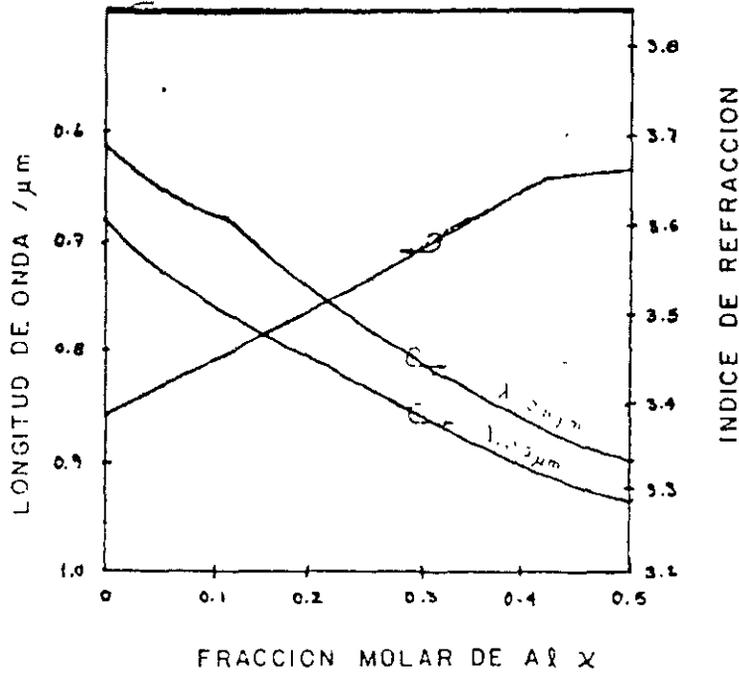
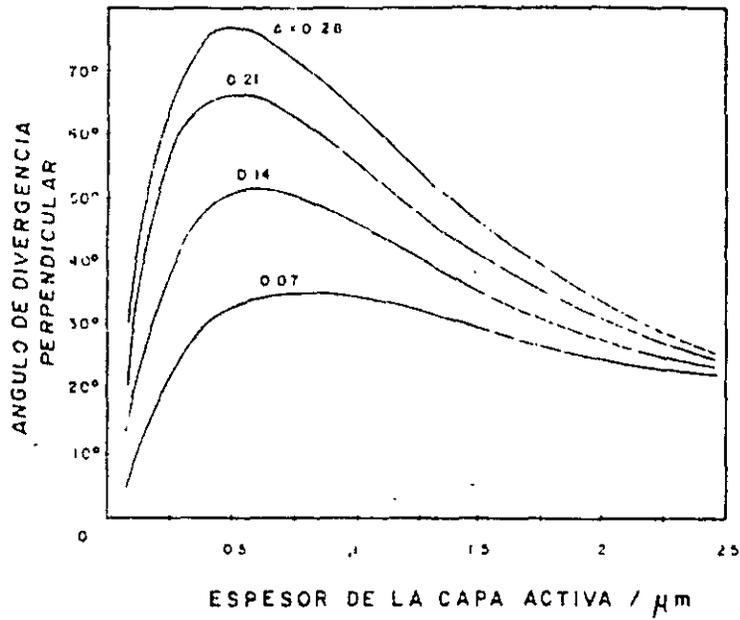
1. **SALIDA ESPECTRAL:** El ancho espectral de un láser semiconductor es normalmente menor de 20 Å, lo que es bastante reducido en comparación con un led, ésta característica permite que el láser sea empleado para comunicación en enlaces largos debido a que el problema de dispersión o ensanchamiento del pulso es mínimo.



2. **CORRIENTE DE UMBRAL.** Debajo de un cierto nivel de corriente la salida óptica de un láser se comporta como la de un led, pero arriba del umbral el láser tiene una salida óptica que se incrementa rápidamente con una eficiencia que se aproxima al 100 %, ver figura.







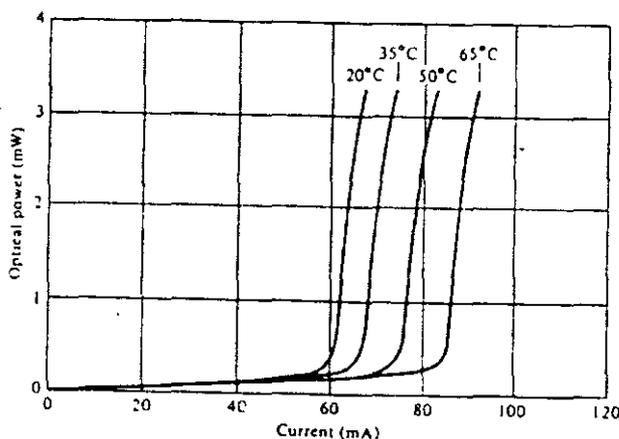


Las principales deficiencias del láser relacionadas con las características de corriente y salida óptica son:

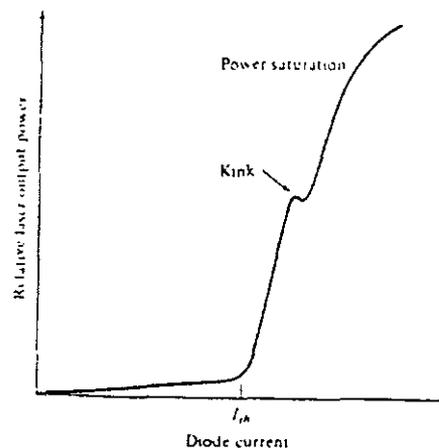
A) Corrimiento del nivel de corriente de umbral con la temperatura:

En la figura (a) se puede observar la gran variación del nivel de umbral con la temperatura, valores de  $0.5 \text{ mA}/^\circ\text{C}$  son comunes. Lo que precisa el uso de controladores como los que son descritos en el capítulo de transmisores ópticos.

B) Falta de linealidad: la salida de la luz varía linealmente hasta un valor de corriente en el cual ocurre un "rizo" en la curva característica. El rizo en muchos casos puede atribuirse a la aparición de un segundo modo transversal.

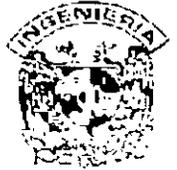


(A)



(B)

C) Eficiencia y ancho de banda de modulación:



## MODULACIÓN ANALÓGICA

La modulación analógica de banda de base de los diodos láser es posible en varios cientos de Mhz, hasta un punto en el cual ocurre una fuerte resonancia debida a la interacción entre la inversión de población y los fotones en la cavidad óptica la frecuencia resonante está dada por :

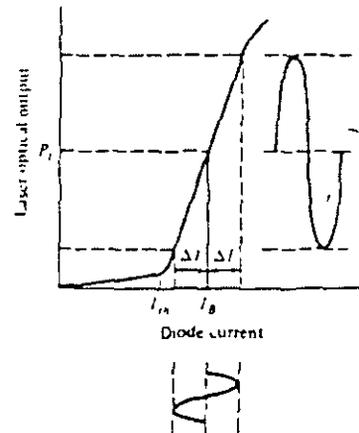
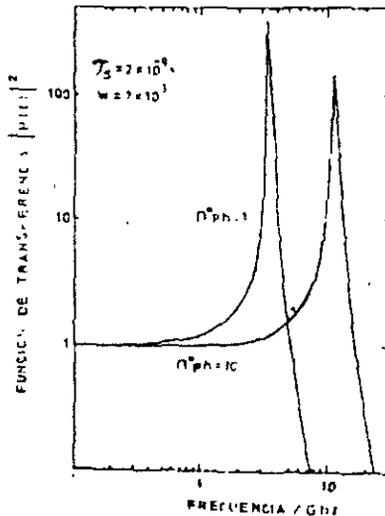
$$W_r^2 \approx \frac{1}{\tau_s \tau_p} \left( \frac{I}{I_u} - 1 \right)$$

donde  $\tau_s$  tiempo de vida de la recombinación espontánea del electrón (1 ns).

$\tau_p$  tiempo de vida del fotón (1 a 10 ps).

$I$  corriente de inyección.

$I_u$  corriente de umbral.

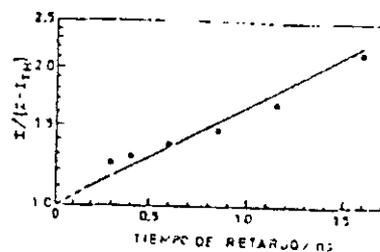




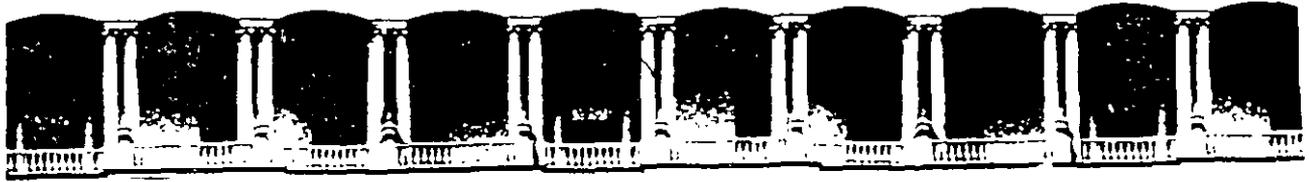
## MODULACIÓN DIGITAL

La modulación digital del diodo láser puede realizarse a velocidades muy altas, del orden de 1 Gbit/seg, sin embargo aparecen varios problemas significativos, el retraso en tiempo  $t_d$  entre los pulsos de luz y corriente está dado por:

$$\tau_D = \tau_s \ln \left[ \frac{I}{I - I_u} \right]$$



y es típicamente de unos cuantos nanosegundos. Además de este retardo se presenta una oscilación amortiguada (aproximadamente en 100 Mhz). Este comportamiento es llamado oscilación por relajación y son producidos por interacción entre los portadores y los fotones, otro tipo de pulsación que ha sido observada es la autopulsación de aproximadamente 0.2 a 2 Ghz. que se caracteriza por su amplitud constante. Para evitar los problemas de oscilación, de relajación, autopulsaciones y rizados, se han propuesto diodos con diversas estructuras basadas en la geometría de franja.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**SISTEMAS ANALÓGICOS DE COMUNICACIONES  
POR FIBRAS ÓPTICAS**

**CONFERENCISTA  
M. en C. ARTURO ARVIZU  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



## INDICE

1. Introducción

2. Técnicas de Modulación

3. Comparación entre las diferentes técnicas de Modulación.-

4. Esquemas de Modulación-Demodulación para sistemas de modulación de pulsos

5. Resultados obtenidos

6. Conclusiones

7. Referencias



# TECNICAS DE TRANSMISION DE SENALES ANALOGICAS DE BANDA ANCHA POR FIBRA OPTICA

## 1. Introducción:

En el presente trabajo se reportan las diferentes alternativas que pueden utilizarse para la transmisión de señales analógicas vía fibra óptica.

Este estudio tiene por objeto el poder determinar la técnica adecuada a utilizar cuando se desea transmitir señales analógicas de banda ancha (entre 5 y 10 Mhz para el caso que nos ocupa) con una alta linealidad y una alta relación señal a ruido.

## 2. Técnicas de modulación:

En la Fig. 1 se muestran las diferentes técnicas de modulación existentes.

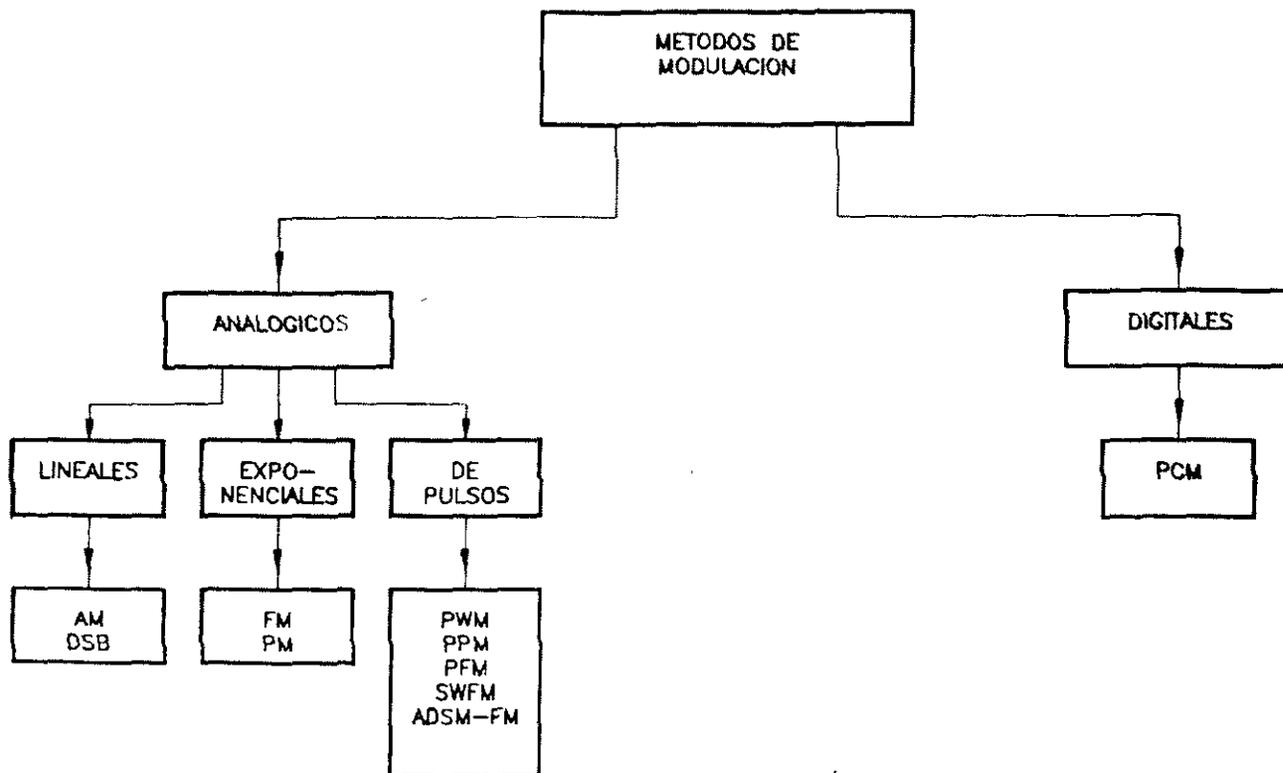


Fig 1 Técnicas de Modulación.



### 3. Comparación entre las diferentes técnicas de modulación

En la tabla 1 es mostrada una comparación entre las diferentes técnicas de modulación mostradas en la fig. 1, esta comparación se basa en los análisis realizados en las referencias (1-7).

TABLA 1 COMPARACION ENTRE LAS TECNICAS DE MODULACION		
TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Modulación lineal: (también conocida como modulación en banda base, en sistemas ópticos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Es una técnica directa.</li> <li>b) Ancho de banda de los circuitos de procesamiento de señal reducido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) No linealidad de los dispositivos ópticos transmisores.</li> <li>b) Dependencia de las características de los fototransmisores con la temperatura y el envejecimiento.</li> <li>c) Cuando se realizan compensaciones, es necesario hacerlas para cada fototransmisor en particular.</li> </ul>
2. Modulación digital: (PCM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Es el método más utilizado actualmente para transmitir información vía fibra óptica.</li> <li>b) Tiene todas las ventajas asociadas con una transmisión de señales digitales (menos susceptible al ruido, entre otras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Para transmitir señales analógicas de banda ancha con una alta linealidad y una buena relación señal a ruido, se requieren muestreadores muy rápidos y con un número "regular" de bits, así por ejemplo, para digitalizar señales de video, se habla de velocidades de transmisión mayores de 100 Mbits/seg. para señales digitalizadas con 8 bits.</li> <li>b) Se requiere toda la circuitería asociada con un equipo PCM (MUX, CODECS,</li> </ul>



		etc.) trabajando a velocidades relativamente elevadas (mayores de 100 Mbits/seg.)
3. Exponencial (FM, PM)	Buena relación señal a ruido (SNR) teóricamente mayor que la de las técnicas lineales.	Dado que su portadora es senoidal se ve afectada por las no linealidades del fototransmisor, lo cual afecta en el desempeño del sistema al realizarse una conversión distorsión de amplitud-modulación de fase o frecuencia, lo cual es indeseable
4. Modulación de pulsos	Tiene la ventaja de utilizar una portadora cuadrada la cual no se ve afectada por las no linealidades del fototransmisor.	
4.1 Modulación por ancho de pulso (PWM) :	a) Circuito f.a relativamente sencilla.  b) Existe la posibilidad de realizar modulación de ancho de pulso a alta velocidad utilizando un circuito monoestable de alta frecuencia.	a) Ineficiente, ya que gran parte de la energía transmitida no contiene información dado que ésta viene dada por las variaciones del pulso alrededor de un valor nominal de interés.  b) Dado que el ancho del pulso varía, se hace necesaria la utilización de un circuito de control automático de ganancia (CAG) en recepción.  c) Dificultad de realización de un generador de onda triangular (el cual es parte fundamental del modulador) con buena linealidad a alta frecuencia.  d) Dificultad para obtener comparadores de alta velocidad y respuesta plana



		en frecuencia (los cuales son necesarios en el modulador.) e) Su relación señal a ruido es la más baja de todos los esquemas de modulación de pulso.
4.2 Modulación delta-sigma asíncrona con frecuencia modulada (ADSM-FM)	a) Su relación señal a ruido es mejor que la de PWM. b) Se obtiene una modulación frecuencial con una linealidad mejorada.	a) Su relación señal a ruido es menor que la de PFM. b) Difícil de implantar a alta frecuencia. c) Es necesario utilizar CAG en recepción.
4.3 Modulación de pulsos en frecuencia (PFM) :	a) Teóricamente el modulador y demodulador son de fácil implantación. b) Su relación señal a ruido es mejor que la de ADSM-FM y la de PWM. c) Demodulación sencilla (5610 se necesita teóricamente un filtro paso bajas) .	a) Es difícil encontrar VCO's con buena linealidad, respuesta plana a alta frecuencia y buena estabilidad térmica. b). Se requiere utilizar CAG en recepción.
4.4 Modulación en frecuencia de señales cuadradas con ciclo de trabajo de 150% (SWFM)	a) Su relación señal a ruido es mejor que la de PFM. b) Su modulador es más sencillo que el de PFM. c) No necesita CAG en recepción.	a) Dado que se necesita utilizar un VCO en el modulador tenemos los mismos problemas que en (a) del inciso 4.3
5. Modulación por posición de pulsos (PPM)	a) Su relación señal a ruido es la más alta de todos los esquemas de modulación de pulso b) Eficiente en uso de potencia	a) Su modulador se implanta a partir de un modulador con los problemas mencionados en (c) y (d) de 4.1 b) Su demodulador tiene una complejidad de realización superior a la de cualquiera de los esquemas de modulación de pulsos

Para todos estos tipos de modulación (ADSM-FM, PFM, SWFM) se requieren circuitos monoestables de alta frecuencia, con buena linealidad, respuesta plana en frecuencia y buena estabilidad térmica.



#### 4 . Esquemas de modulación-demodulación para sistemas de modulación de pulsos.

A continuación se muestran los diagramas a bloques de los diversos esquemas de modulación-demodulación para sistemas de modulación de pulsos; asimismo, se muestra una gráfica (tomada de la referencia 1) donde se ilustra la relación señal a ruido para los sistemas de modulación de pulsos en función de la potencia recibida para unos parámetros dados .

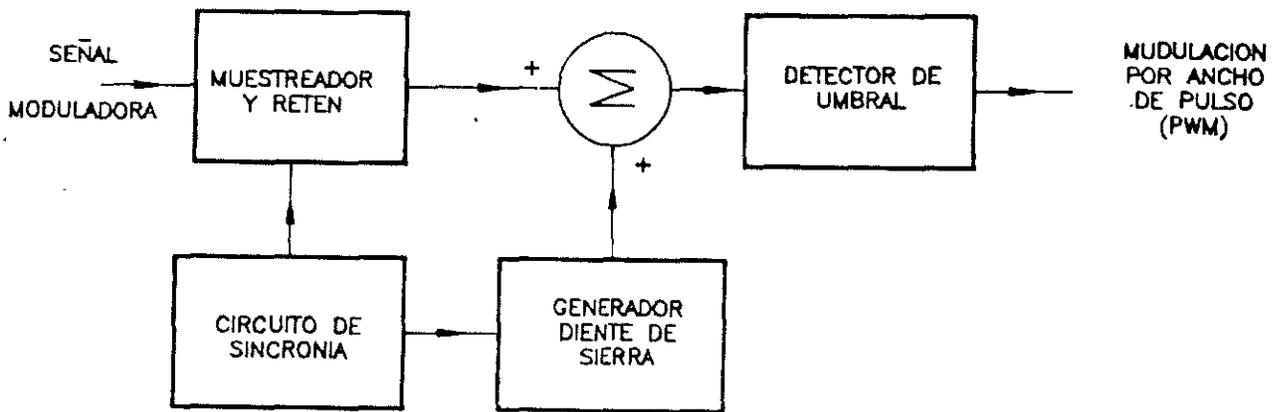


Fig. 2.- Generación de Modulación PWM con muestreo uniforme.

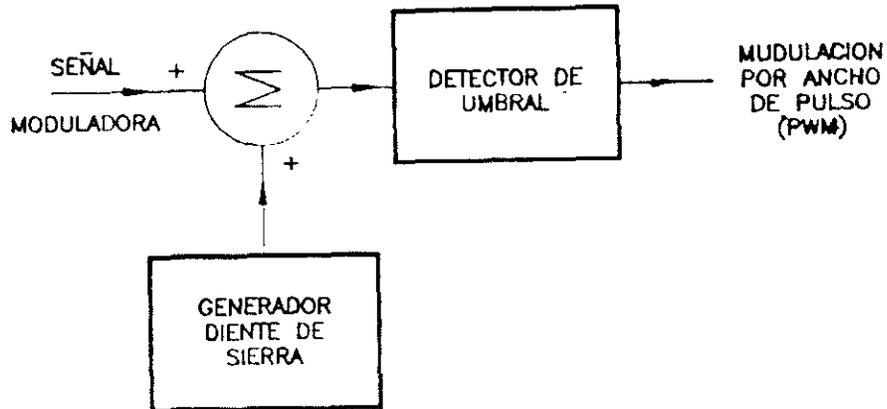


Fig. 3.- Generación de Modulación PWM con muestreo no-uniforme.

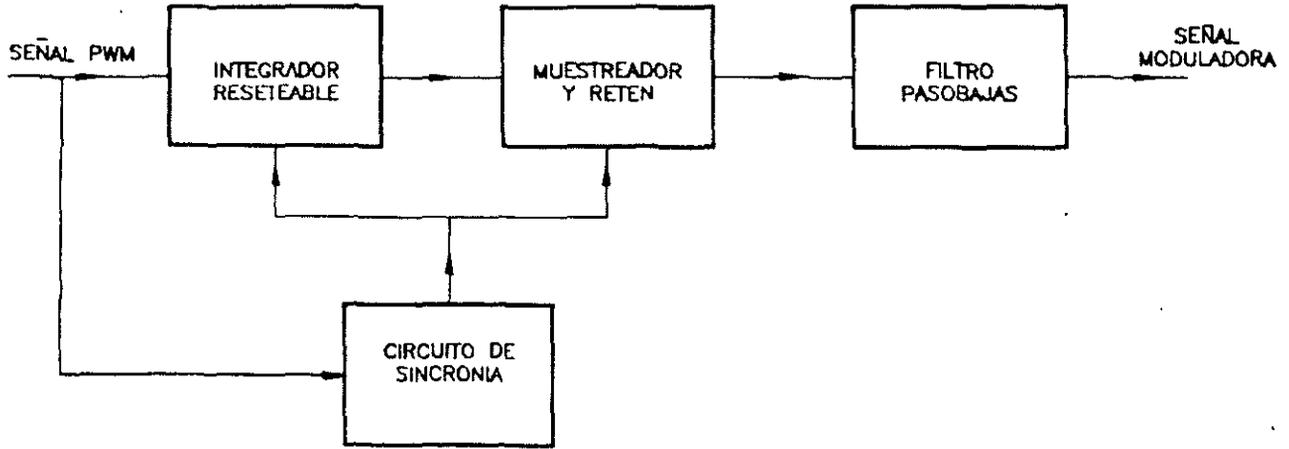


Fig. 4.- Demodulación PWM

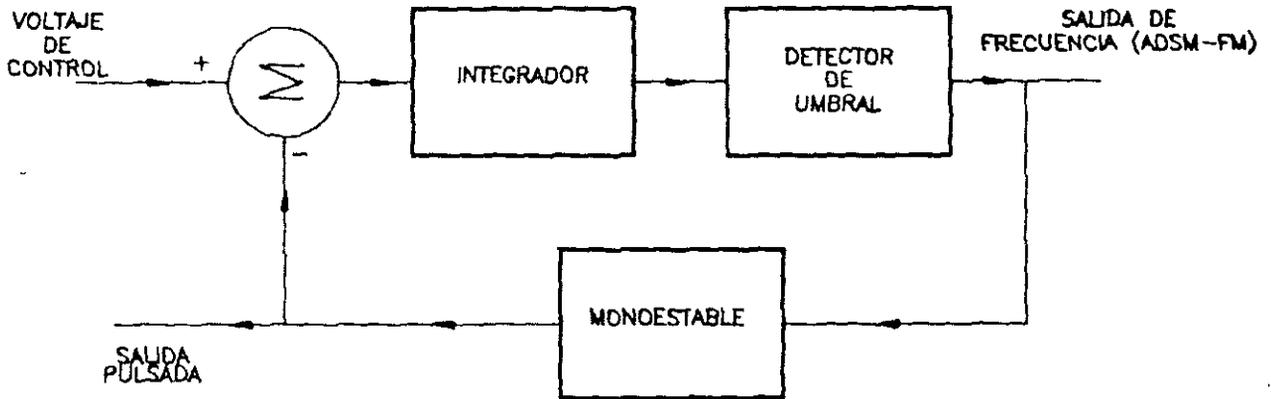


Fig. 5.- Generación de Modulación ADSM-FM

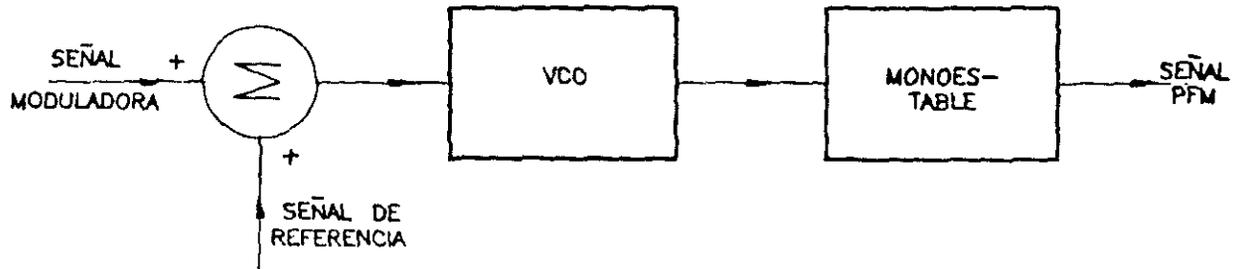


Fig. 6.- Generación de Modulación PFM

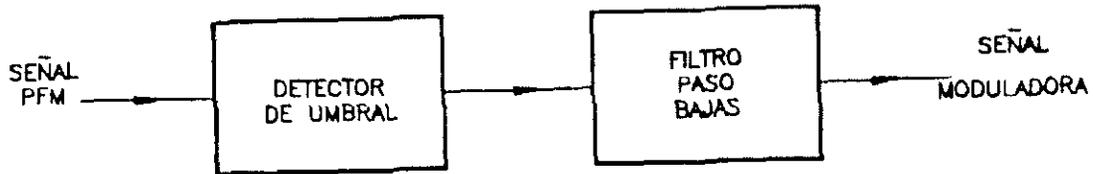


Fig. 7.- Demodulación PFM

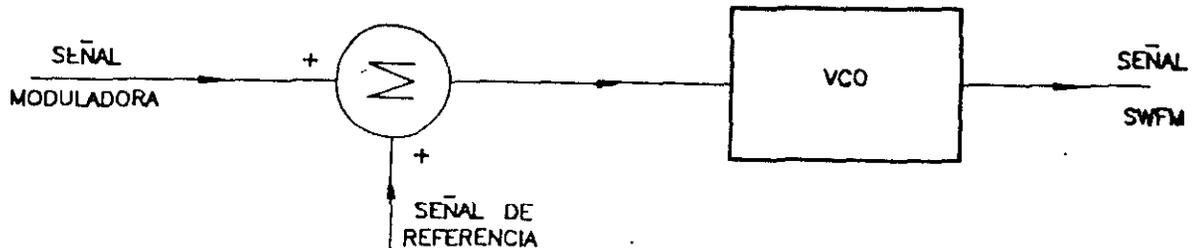


Fig. 8.- Generación de Modulación SWFM

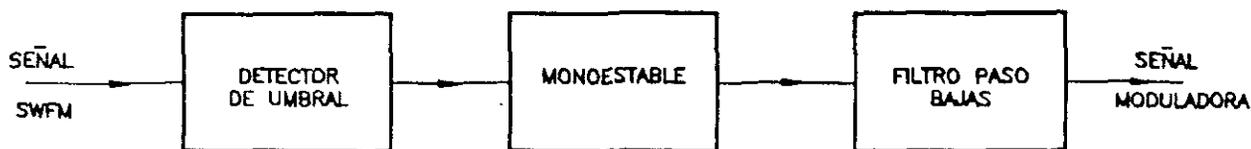


Fig. 9.- Demodulación PFM

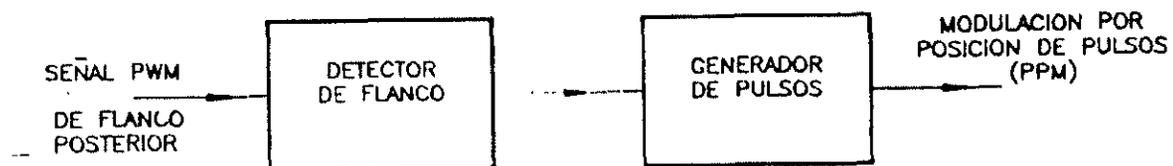


Fig. 10.- Generación de Modulación PPM

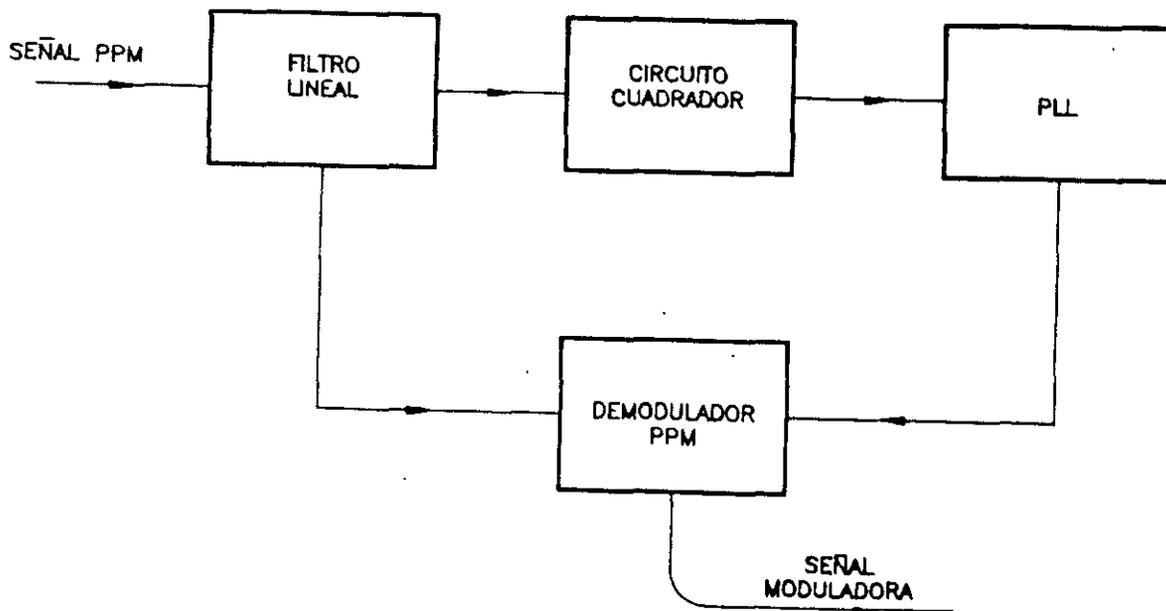


Fig. 11.- Demodulación PPM

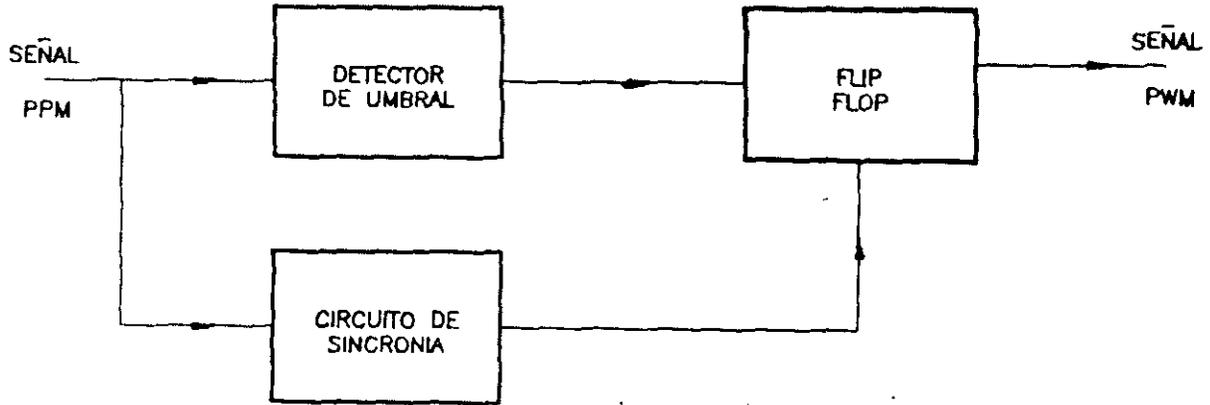


Fig. 12.- Diagrama a bloques de un demodulador PPM.

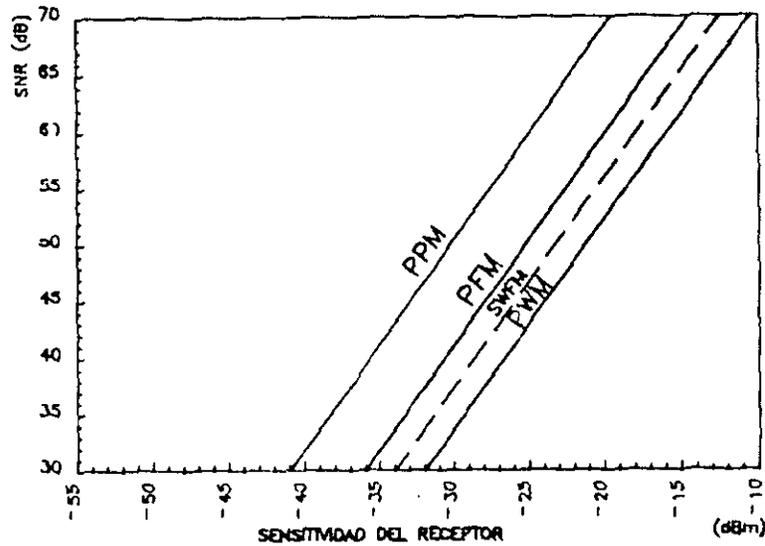


Fig. 13.- SNR (dB) para un receptor con diodo PIN en función de la potencia óptica de recepción (referencia 1).



## 5. Resultados obtenidos.

A continuación se muestra una tabla donde se resumen los resultados obtenidos del análisis realizado para las técnicas de modulación de pulsos.

TABLA2 RESULTADOS OBTENIDOS				
TECNICA	REQUIERE CAG		RELACION SEÑAL A RUIDO CON -30 DBM DE POTENCIA EN EL RECEPTOR, UTILIZANDO PIN (REF. 1) *	COMPLEJIDAD
1. PWM	x		5 (45 dB)	*Se requieren generadores triangulares lineales de alta frecuencia y amparadores rápidos con buena respuesta.
2. ADSM-FM	x		4	*Se necesitan integradores y sumadores de alta frecuencia así como monoestables con buena respuesta
3. PFM	x		2 (60 dB),	*Se requieren VCO' s lineales y monoestables con respuesta plana en frecuencia.
4. SWFM		x	3 (53 dB)	*Mismos problemas que para PFM.



5. PPM		x	1 (70 dBI	*Se requiere generar primero PWM *El demodulador tiene una complejidad de realización elevada.
6. PCM	X		Es dependiente del número de bits utilizado en la conversión analógica digital.	*Se requieren velocidades de procesamiento y transmisión elevadas, por ejemplo, para video codificado a 8 bits se necesita trabajar a velocidades mayores de 100 Mbits/seg.

\*los Nos. fuera de los paréntesis indican la relación entre los diferentes esquemas .



## CONCLUSIONES

De la comparación realizada en las tablas 1 y 2 podemos observar que las alternativas más viables son las referentes a las técnicas de modulación de pulsos y dentro de éstas las más factible de implantar es la modulación por ancho de pulso, la cual está condicionada a poder realizar un generador de onda triangular lo suficientemente lineal y poder disponer de comparadores de voltaje rápidos y con respuesta en frecuencia plana.

Para las técnicas de modulación en frecuencia (PFM, SWFM) se hace necesario disponer de VCO's de alta frecuencia con buena linealidad, respuesta plana en frecuencia y buena estabilidad térmica, lo cual por experiencias del autor del presente trabajo, es muy difícil de lograr.

Opcionalmente, se podría intentar la realización de un esquema PPM, sin embargo, dicha realización está condicionada a lograr en primer lugar, la modulación PWM.



## 7. REFERENCIAS

1. V.Di Biase, P. Passeri, R. Pietroivsti, "Pulse Analog Transmission of TV Signal on Optical Fibre", Alta Frequenza, Vol. LVI-No. 4, June 1987.
2. G.G.Windus, "Fibre Optic Systems for Analogue Transmission" the Marconi Review, Vol. XLIV, No.222 2nd Quarter 1981".
3. D.G. Fink, "Electronics Engineer's Handbook" Mc Graw Hill, 1975, U.S.A.
4. C.J. Kikkert, D.J. Miller, "Asynchronous Delta Sigma Modulation", Proceedings of the IREE, April 1975.
5. K. Sato, S. AOYAGI, T. KITAMI, "Fiber Optic Video Transmission Employing Square Wave Frequency Modulation", IEEE Trans. on Comm., Vol. COM-33, No.5, May 1985.
6. C. Chen, C.S. Gardner, "Performance of PLL Synchronized Optical PPM Communication Systems" IEEE Trans. on Comm., Vol. COM-34, No.10, Oct. 1986.
7. A.B. Carlson, "Sistemas de Comunicaci6n" Mc Graw-Hill, 1980, México.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**P.C.M. REDES DIGITALES INTEGRADAS**

**CONFERENCISTA  
M.en C. CARLOS E. HIRSCH GANIEVICH  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



## MULTICANALIZACION

### 1.- GENERALIDADES

La multicanalización hace posible transmitir decenas o cientos de comunicaciones a un mismo tiempo. Cada canal tiene un ancho de banda limitado; existen 2 técnicas principales de multiplexación.

- a) Por división de tiempo (MDT)
- b) Por división de frecuencia (MDF)

### 2.-MULTICANALIZACION POR DIVISION DE FRECUENCIA ( MDF ) .

El principio de ésta es intercalar todas las señales que se desean transmitir, en el dominio de la frecuencia, ya que cada canal tendrá como característica un ancho de banda fijo, se utiliza su información para modular una portadora, donde los límites (inferior y superior) de la señal resultante aumentarán de acuerdo con el número de canales que se quiere transmitir.

El ancho de banda disponible del medio de transmisión se divide en bandas o subcanales más angostos; cada usuario tiene disponible durante todo el tiempo, una parte del espectro total. En el transmisor, las señales individuales se insertan en los subcanales, modulando la amplitud de frecuencias portadoras apropiadamente seleccionadas. En el receptor, las señales se separan mediante el uso de filtros pasabanda.

Como puede observarse, el ancho de banda para cada canal es constante, lo único que varía son los límites tanto inferior como superior; en consecuencia, la capacidad de un equipo dependerá de la frecuencia máxima que maneje.

### 3.- MULTICANALIZACION POR DIVISION DE TIEMPO ( MDT )

En la multicanalización por división de tiempo el medio de transmisión se comparte estableciendo una secuencia de intervalos de tiempo, durante las cuales las fuentes individuales transmiten en forma alterna; cada usuario dispone del ancho de banda total



durante intervalos de tiempo restringidos. El transmisor asigna periódicamente el canal completo a cada fuente y envía información adicional para que el receptor identifique la duración de intervalo y la fuente de procedencia, de manera que pueda derivar adecuadamente las señales.

Es posible convertir una señal analógica limitada en banda a una forma discreta en el tiempo, por medio de la técnica de muestreo. Los valores muestrados de la señal contienen la información original, y la de modulación puede llevarse a cabo mediante un filtro pasa bajas.

La mayoría de los sistemas de comunicación por pulsos transmiten muchas señales simultáneamente, en lugar de una sola. Se puede explicar a partir del proceso de muestreo, si tenemos una muestra muy estrecha, la mayoría del tiempo no está siendo transmitida información alguna a través del sistema, es posible transmitir entonces información, procedente de otras fuentes en los intervalos vacíos. La transmisión de las muestras de información de varios canales simultáneamente a través de un sistema de comunicación con diferentes muestras escalonadas en tiempo es llamado multicanalización por división de tiempo.

La mayor parte de los sistemas que emplean este tipo de multiplexaje son digitales, esto implica que las señales analógicas son convertidas a un formato digital antes de la transmisión. Las señales digitales (provenientes de terminales de datos, computadoras, impresoras o cualquier otra fuente digital) tienen un formato adecuado.

En un esquema típico las diversas señales a ser transmitidas, son muestreadas secuencialmente y combinadas en un solo canal. El tiempo necesario para que todos los canales sean transmitidos al menos una vez, se denomina TRAMA. Usualmente cada trama lleva un identificador denominado BANDERA DE ALINIACION TRAMA, que es un patrón fijo de bits, con ciertas características, para ser localizado fácilmente en el receptor.

Si varias de las señales que serán multicanalizadas tienen anchos de banda diferentes o como comúnmente es el caso, con fuentes de datos que tienen diferentes velocidades de bits, se puede usar 2 aproximaciones: proporcionalmente tomar más muestras de la señal de ancho de banda más amplio, o las señales que varían más lentamente pueden primero ser combinadas en una señal analógica de ancho de banda amplio por medio de la técnica MDF.

Es obvio que el ancho de banda necesario en la transmisión se incrementa con el número de señales, y es proporcional al recíproco del ancho  $T$  de los pulsos transmitidos, entonces el ancho de banda requerido para transmitir los pulsos mostrados sería



aproximadamente  $n/T$  Hz, siendo  $n$  el número de pulsos que forma un trama. Obviamente, para reducir el ancho de banda es necesario ensanchar al máximo los pulsos, justo hasta el punto donde comienza a superponerse.

Como un ejemplo, suponiendo 30 canales de voz, cada uno limitado en banda a 4 Khz, multicanalizándolos en tiempo en un canal.

Los pulsos sucesivos están espaciados 4.2 useg.

El ancho de banda requerido para transmitir estos pulsos es aproximadamente de 240 Khz. El filtro que aparece en la figura es usado para ensanchar los pulsos como se requiera. El filtrado podría ser incorporado en la operación de muestreo.

Un problema que se introduce en la multicanalización en tiempo es la sincronización de los pulsos sucesivos en el receptor, esto es, que los pulsos en la recepción deben ser entregados al destino apropiado lo que implica que un interruptor está dispuesto en el receptor y sincronizado con el interruptor del transmisor.

Varias técnicas se han utilizado en la práctica para realizar la sincronización y reconocimiento de los canales, por ejemplo:

- El uso de pulsos especiales, etiquetados para ser fácilmente diferenciables de los pulsos de la señal regular ( bandera de alineación de trama ).
- Ondas senoidales continuas de fase y frecuencia conocidas, las cuales pueden ser filtradas en el receptor para proveer la información de sincronización necesaria.
- Esquemas que dan información de sincronía desde los pulsos de la misma señal transmitida por medio de promedios de periodos largos de tiempo ( alineación estadística ).

En la multicanalización de señales digitales, los siguientes puntos deben tomarse en cuenta:

1. Se deben incorporar algunas estructuras de trama, representando la unidad más pequeña de tiempo en la cual todas las señales son enviadas al menos una vez.
- 2.- La trama se divide en intervalos de tiempo, asignado únicamente a cada fuente de datos conectado.



3.- Los bits de alineación de trama y sincronización se deben fijar para que el receptor sea capaz de sincronizar en tiempo, el inicio de cada trama, con cada ranura. Estos bits son llamados bits de control.

4.- Cuando los relojes de los afluentes son plesiocronos, es necesario hacer una previsión para el manejo de pequeñas variaciones en la velocidad de bit de la señal digital de entrada.

Una trama (estructura) típica aparece en la figura y corresponde al primer nivel del sistema de 30 canales, en donde B representa la bandera de la alineación de trama que en este caso está colocada al principio de la trama y 30 canales digitales son multiplexados; existe un canal adicional S para señalización, lo que completa los 32 canales de la trama y da origen a que este sistema sea también conocido como 30 + 2 canales.

Cada canal contiene 8 bits y una velocidad de 64 Kbit/s. La bandera de alineación de trama es X0011011 y se envía en tramas alternadas. La velocidad de salida es 2.048 Mb/s.

A continuación se mencionan algunas ventajas y desventajas de la técnica de MDT en relación con el multiplexaje por división de frecuencia.

Ventajas :

- Bajo costo en equipo terminal
- Mejor inmunidad contra el ruido
- Facilidad de regeneración
- Posibilidad de tratamiento digital (almacenamiento y procesamiento de la información)

Desventajas:

- Mayor ancho de banda
- Necesario convertidor analógico digital



#### 4. ORDENES DE MULTICANALIZACION

El Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía ( CCITT), ha recomendado dos jerarquías de multiplexaje digital. La primera, utilizada en E.E.U.U. y Japón principalmente, se basa en los sistemas T1 de 24 canales.

El multicanalizador T1, aunque fué diseñado, originalmente para multiplexar canales telefónicos. Cualquier señal de 56 Kb/s, del formato apropiado, podría ser transmitida como uno de los 24 canales. Similarmente, a un nivel más alto en la jerarquía, no todas las entradas necesitaron haber sido derivadas de un multiplexor de bajo nivel. En el nivel T3 por ejemplo, algunas de las entradas a 6.312 Mb/s podrían representar entradas de TV digitales; otras podrían ser señales T1 multiplexadas en grupos de 4 ( señales T2 ), transmitiendo información de voz; otras pueden ser derivadas por multiplexaje ascendente y combinando apropiadamente el tráfico de datos de más baja velocidad.

La multicanalización de señales permite a un canal de transmisión dado, ser compartido por un número de usuarios, reduciendo el costo. Una jerarquía similar, pero usando diferentes niveles de velocidades de bit, ha sido también establecida como una norma internacional por el CCITT, basándose en el sistema de 30 canales y se utiliza ampliamente en México, y resto del mundo.

El primer nivel PCM multicanaliza 30 canales a 64 Kb/s cada uno, con dos canales adicionales usados para alineación de trama, señalización y otros propósitos. En este punto difiere de la norma T1.

Estas jerarquías a muy alta velocidad han sido desarrolladas para el uso de los sistemas de comunicaciones nacionales y están basados históricamente en las normas PCM usadas para canales de voz digitales, aunque también pueden ser otros tipos de señales.

#### 5. OPERACION DEL MULTICANALIZADOR

En las jerarquías propuestas por el CCITT, se especifican dos tipos, de acuerdo con la técnica empleada para tomar las informaciones de entrada y obtener la salida o trama principal, y son:

- Multicanalizadores PCM
- Multicanalizadores digitales



En un multicanalizador PCM básicamente sus entradas son analógicas y se obtiene a su salida una señal digital. Dentro de sus funciones realiza una conversión analógica / digital por canal, muestrea la información de entrada a una velocidad de 8 KHz, codifica cada uno de los canales de 8 bits de cada canal son transmitidos en forma de conjuntos individuales claramente identificables.

Un multicanalizador digital tiene como entradas señales digitales y su salida es digital, este tipo de multicanalizadores dentro de la jerarquía se encuentra a partir del segundo orden, no tienen una estructura de entrelazado de octetos, en su lugar se emplea el entrelazado de bits; la velocidad de repetición de la trama no necesariamente es de 8 KHz.

Para solucionar el problema de sincronía en estos sistemas se emplean técnicas que controlan la integridad de las secuencias binarias, denominadas técnicas de justificación, las cuales pueden ser:

- Justificación positiva
- Justificación positiva/cero/negativa

La justificación positiva consiste en agregar a la trama original un bit extra por tributario, haciendo que la velocidad de la trama sea ligeramente mayor que la velocidad de entrada, estos bits se colocan en un lugar fijo de la trama y son llamados bits de justificación de tal manera que cuando sea necesario compensar variaciones de velocidad, los bits de justificación pueden contener o no un bit significativo.

Durante la operación de desmulticanalización, es necesario determinar si el bit de justificación contiene información o no, para este propósito, bits especiales llamados bit de control o indicación de justificación son insertados sistemáticamente y preceden al bit de justificación, los que indican su naturaleza al bit de justificación, los que indican su naturaleza al demultiplexor.

La justificación positiva/cero/negativa consiste en emplear 2 bits, uno de ellos llamado de justificación positiva (J+), los cuales se encargarán de ajustar la velocidad de la transmisión de información a la velocidad real.

El tipo de justificación se establece por medio de un código en los bits de justificación, de manera que se tiene :

- Justificación positiva cuando los bits J+ y J- no tiene información.
- Justificación cero cuando el bit J+ contiene información y J- no la tiene.



- Justificación negativa cuando los bits J+ y J- contienen información.

## 6.- MULTICANALIZACION POR ENTRELAZADO DE OCTETOS

Esta técnica de intercalado de octetos es utilizada para la transmisión de información en forma síncrona, de manera que las variaciones a velocidad en la entrada serán proporcionales a las variaciones de velocidad del propio multicanalizador en otras palabras todas las entradas tienen la misma velocidad de bit y dependen del mismo reloj del multiplexor.

El principio de esta técnica básicamente consiste en tomar los 8 bits de cada uno de los canales de las entradas en forma cíclica, y transmitir cada uno de los canales hasta formar la trama de salida a una velocidad más alta.

## 7.- MULTICANALIZACION POR ENTRELAZADO DE BITS.

Esta técnica de intercalado de bits, difiere de la estructura anterior básicamente en que la transmisión de la información se lleva a cabo en forma plesiócrona y la salida está formada por un grupo de bits, que fueron tomados en forma individual de tordo grupos; para ejemplificar si se observa la figura, cuatro grupos de bits como entradas son combinados en un grupo de bits como salida, lo que significa que un bit del grupo 1 es seguido por un bit del grupo 2 y así.

El grupo de bits resultante en la multiplexación tiene una velocidad digital más alta que 4 veces la velocidad de los tributarios; una razón de ésto es que el grupo de bits de orden más alto necesita su propia palabra de sincronización y algunos bits de servicios agregados al grupo de bits. Además, contiene una previsión para observar diferencias de frecuencias entre grupos de bits tributarios y el reloj del demultiplexor, ésto es necesario porque cada sistema tributario puede tener su propia frecuencia de reloj.

Para compensar la diferencia en velocidades de la información proveniente de los tributarios, se emplean técnicas de justificación (descritas anteriormente), en este ejemplo se inyectan bits desocupados en la señal, junto con los bits de control indicando el estado de



los bits libres. Estos bits de control son usados en el desmulticanalizador para llevar a cabo la desmulticanalización exacta sin pérdida de información.

El método descrito correspondiente a la justificación positiva, y es generalmente usado como la forma más sencilla para la transmisión de información pliesióncrona.

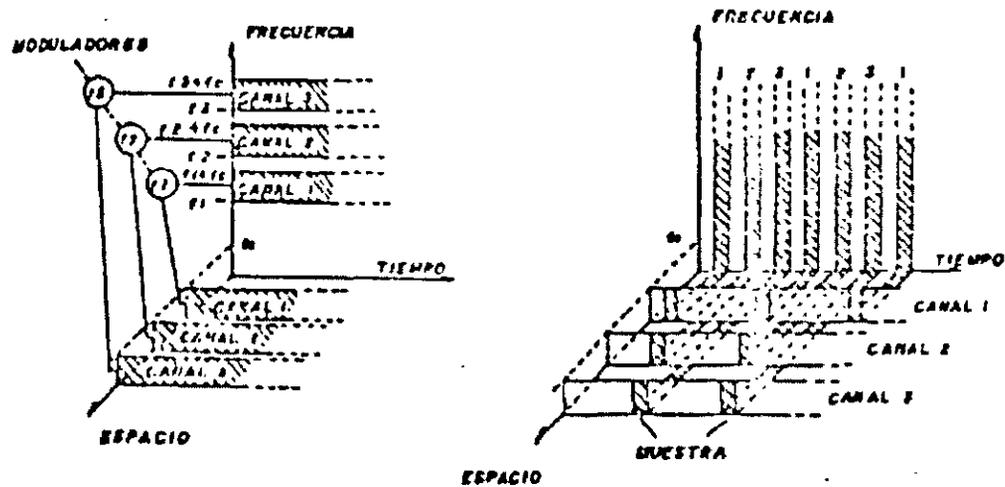


Figura 1. Multiplexaje por división de tiempo y frecuencia.  
a- División de frecuencia  
b- División por tiempo

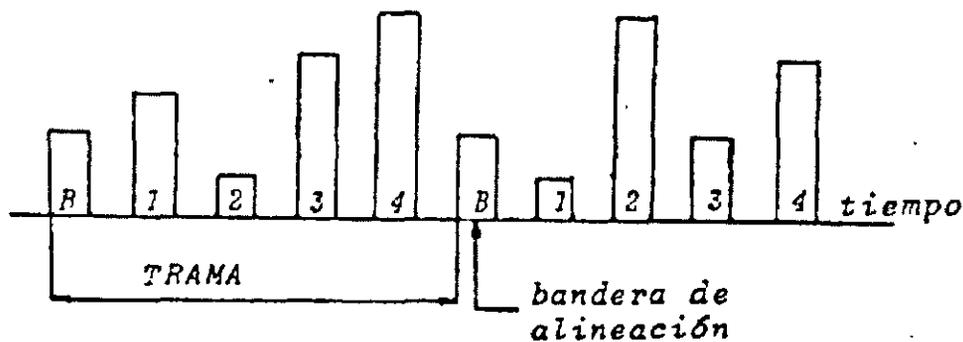


Figura 2. Multiplexaje por tiempo

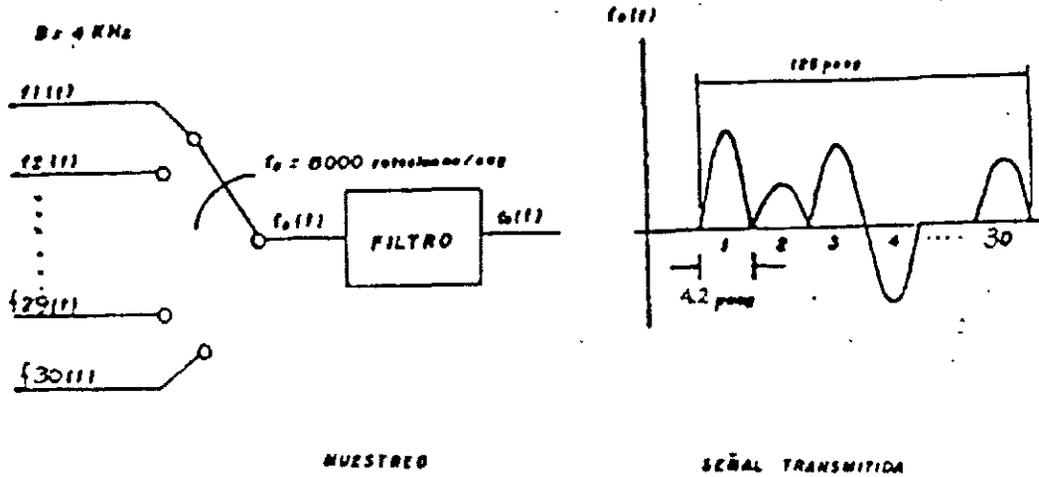


Figura 3. Canales de voz multiplexados en tiempo

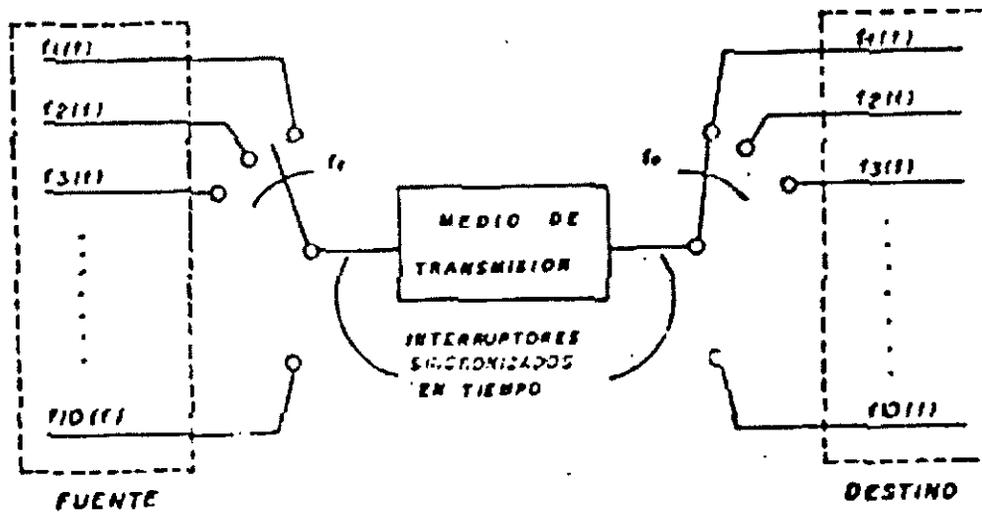


Figura 4. Sincronización de un sistema de multiplexaje

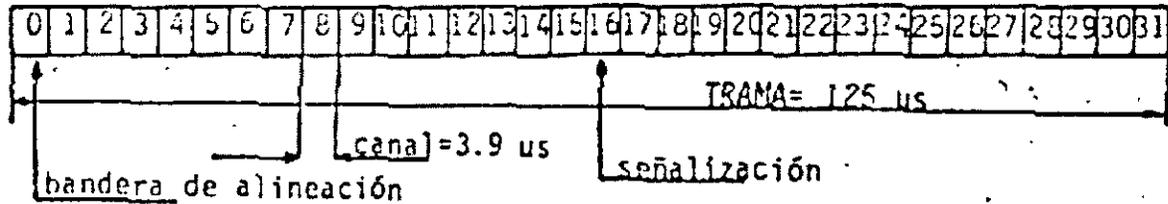


Figura 5. Sistema de 30 canales, entrelazado de octetos

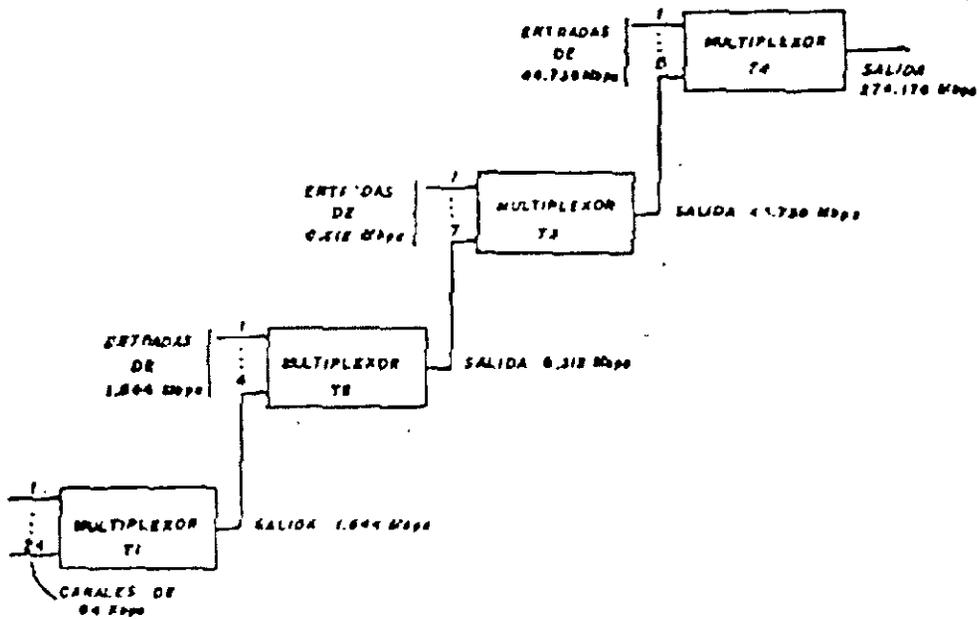




Figura 6. Jerarquía digital, sistemas de 24 canales

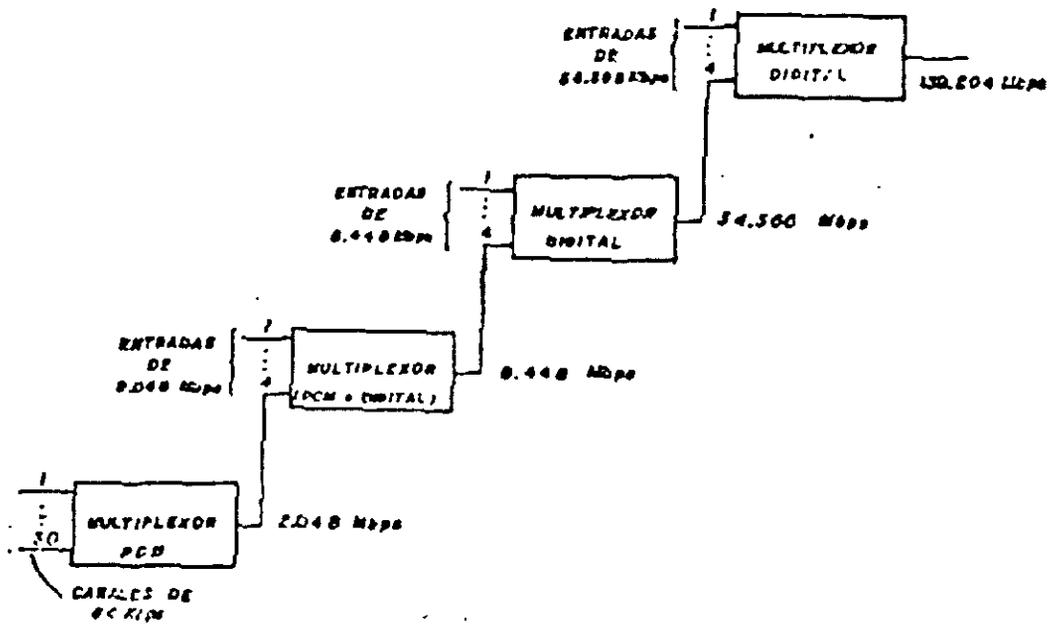


Figura 7. Jerarquía digital, sistemas de 30 canales

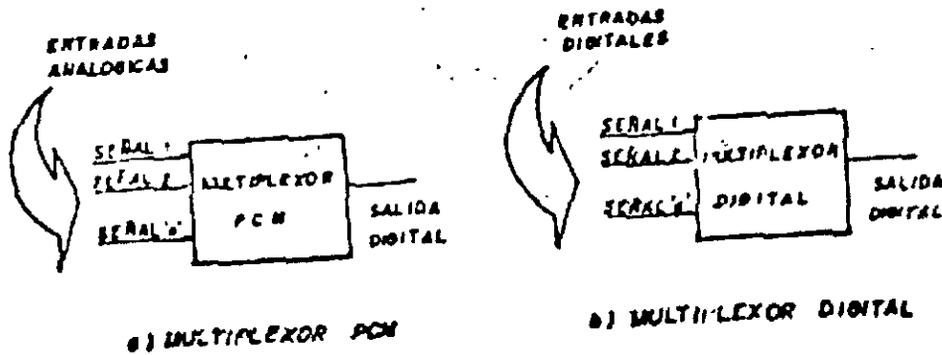


Figura 8. Tipos de multiplexores.

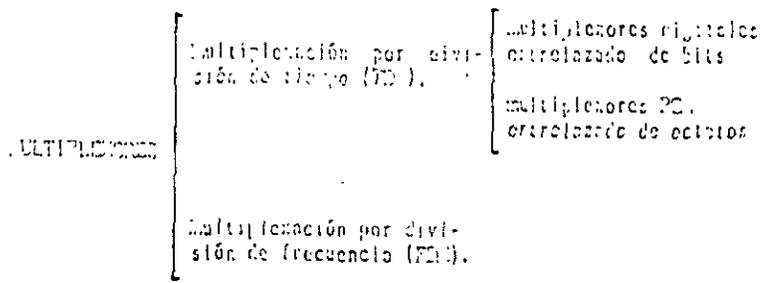
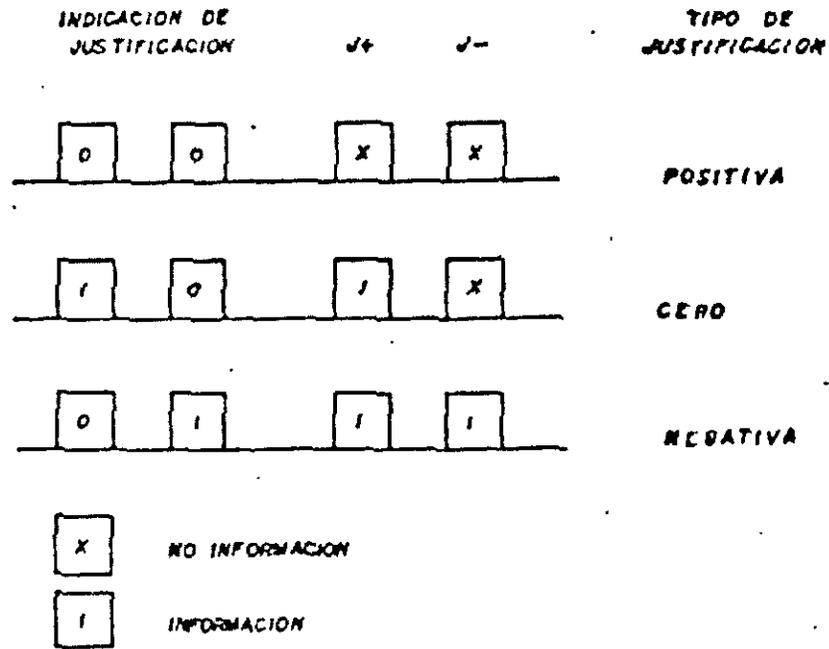


Figura 9. Justificación positiva/cero/negativa

Figura 10. Clasificación de los multiplexores.

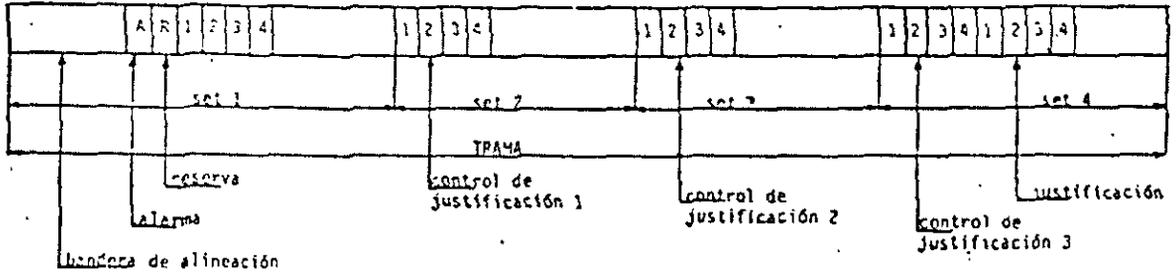


Figura 11. Estructura de trama de segundo nivel (3.448 b/s)  
Entrelazado de bits.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**EMPALME, CONEXIÓN Y MEDICIÓN EN  
ATENUACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS**

**CONFERENCISTA  
ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA  
PALACIO DE MINERÍA  
- MAYO 2000**

# 1. INTERCONEXIÓN ÓPTICA

La conexión de los elementos que integran un sistema de comunicación por fibra óptica; es una de las consideraciones fundamentales para la realización teórico-práctico adecuada. La conexión se puede realizar en dos niveles:

1. Entre fibras, siendo de dos tipos: a) empalme, que es una unión fija, b) conector, la cual es una unión móvil.
2. Entre cables, se usa lo que se conoce como cierre o caja de empalmes.

El empalme encuentra su mayor aplicación en la planta externa y en menor grado en el equipo de oficina. El empalme puede ser de dos tipos: 1) Mecánico, el alineamiento y sujeción de la fibra se realiza por medios mecánicos, térmicos y adhesivos 2) Por fusión, se aplica a las fibras una elevada temperatura que las funde, al normalizar la temperatura las fibras quedan unidas permanentemente es el que se emplea mayormente y se realiza por microflama o arco eléctrico, siendo esta última técnica la que ha dado mejores resultados. El conector se usa más en el equipo de oficina que en la planta externa. El cierre de empalmes se usa básicamente en la planta externa.

La conexión óptica no es tan sencilla como la conexión eléctrica; donde sólo se requiere contacto eléctrico que se obtiene torciendo y soldando los conductores metálicos. La unión óptica requiere alineamiento y conexión precisos del núcleo de la fibra, lo cual se dificulta por las dimensiones reducidas. Todos los tipos de conexión óptica deben tener las siguientes características: pérdida reducida y estable a las condiciones ambientales, confiabilidad en el plazo largo, sencillo de realizar y con el tiempo y costos reducidos.

## 1.1 Pérdidas en el empalme

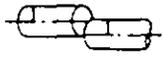
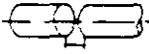
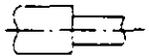
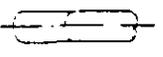
El objetivo de la conexión óptica es acoplar o transferir potencia óptica de un punto a otro. Sin embargo, en la transferencia de potencia existe pérdida causada en el elemento de conexión, estas pérdidas se clasifican en:

1. Intrínsecas, se deben a las variaciones de las características propias de la fibra como son: diámetro del núcleo, apertura numérica, índice de refracción, concentricidad, etc. Estas propiedades dependen del proceso de fabricación pudiendo variar entre fibras aún del mismo fabricante.
2. Extrínsecas, son función de la técnica de unión empleada, se producen por terminaciones defectuosas en el extremo de la fibra, reflexiones de Fresnel y por desalineamiento del núcleo. Los desalineamientos pueden ser de 3 tipos, longitudinal, transversal y angular. Los 3 desalineamientos y las reflexiones de Fresnel, introducen pérdidas que son acumulativas. Aunque estas fuentes de pérdida son algo

interdependientes, para el mejor entendimiento de su efecto, se pueden considerar independientes.

En la tabla 1.1 se resumen los factores de pérdida que afecta la conexión en fibras multimodo de índice gradual (GI) y en fibras unimodo (SM). Los efectos de imperfecciones afectan más a la fibra SM que a la fibra GI, esto se debe a que la fibra unimodo tiene un núcleo con dimensiones menores.

*Tabla 1.1 FACTORES DE PÉRDIDA EN LA CONEXIÓN DE LA FIBRA*

FACTORES	CONFIGURACION
DESALINEAMIENTO DEL EJE DEL NUCLEO	
SEPARACION	
ANGULO	
INCLINACION EN EL EXTREMO DE LA FIBRA	
DIFERENCIA EN EL DIAMETRO DEL NUCLEO	
DIFERENCIA EN EL INDICE DE REFRACCION	

---

## 1.2 Empalme.

Existen dos tipos de empalmes para unir fibras ópticas: Temporales (mecánicos) y Permanentes (por arco de fusión).

Los temporales se hacen por medio de conectores que presentan alto costo y generalmente tienen gran atenuación, mientras que los empalmes por fusión resuelven estos inconvenientes, ya que se requiere una atenuación inferior a 0.2 dB por empalme.

Por lo tanto, debido a que se requiere de baja atenuación en empalmes, abatir los costos (ya que el número de empalmes en larga distancia es elevado) y no se requieren deshacer los empalmes, es conveniente utilizar empalmes por fusión.

### **Empalmadora de fusión de arco eléctrico.**

La utilización de la empalmadora de fusión es muy común debido a que con éste equipo se logran empalmes de muy baja atenuación.

El empalme por fusión consiste en aplicar calor en las puntas de las fibras a unir, suavizandolas y fusionandolas (ver figura 1 ).

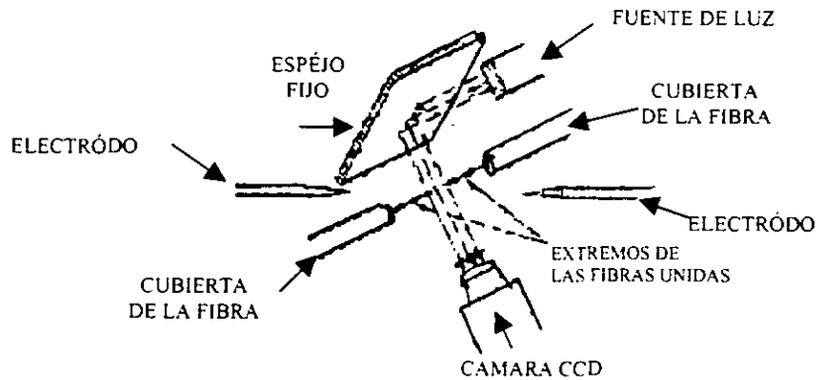
Las fibras deben de prepararse en sus extremos, eliminando la cubierta primaria y cortandolas de tal manera que su punta quede plana y perpendicular al eje de la fibra. Después de esto, deben de ser limpiadas de polvo y grasa perfectamente, con utensilios adecuados.

A continuación las fibras a empalmar son montadas en la base ranurada de la empalmadora y sujetadas por los componentes de anclaje de la empalmadora; sin embargo existen aditamentos para sujetar de mejor manera los extremos de la fibra y no exista un desalineamiento.

La posición de la fibra es controlada manual o automáticamente por microprocesadores que accionan los motores de la empalmadora, con la libertad de poder moverse en las tres direcciones del espacio para obtener un alineamiento óptimo, monitoreado por un microscópio y luego mostrado en una pantalla.

La empalmadora alinea el lado derecho de la fibra en la dirección X y el lado izquierdo en la dirección Y.

La fusión se realiza automáticamente por la empalmadora. Al momento del empalme, la empalmadora eleva el espejo y empalma las fibras por arco de fusión. El principio del proceso de empalme se muestra en la siguiente figura.



*Figura 1 Principio de empalme por arco de fusión.*

La estimación de las pérdidas por empalme es realizada automáticamente por la empalmadora, mide la distancia de los ejes del núcleo procesando la imagen y estimando las pérdidas del empalme.

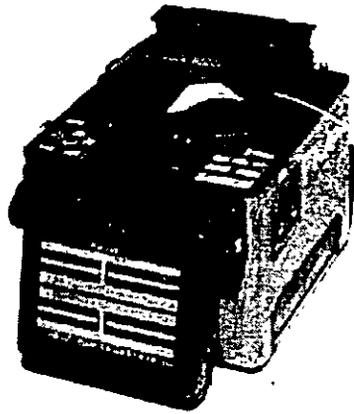
Cuando la maquina ha cumplido este proceso muestra en la pantalla la medición estimada del empalme.

La marca Fujikura suministra equipos de interconexión y empalmadoras ópticas con las características siguientes:

- Alineamiento núcleo-núcleo utilizando el Sistema de Alineamiento de Perfil (PAS)
- Alta capacidad de fuerza de tensión de empalme
- Capacidad de longitud corta de adherencia
- Sistema de sujeción de fibras para una operación de pérdida de habilidades
- Monitor de color de alta resolución de 5 pulgadas
- Observación simultánea en los ejes X y Y
- Función de calibración automática de potencia del arco
- Capacidad de interface hacia la PC y medición de potencia de retroalimentación
- Empalmes rápidos y totalmente automático
- Identificador automático de tipos de fibras
- Función de autoprueba
- Compactas y ligeras

---

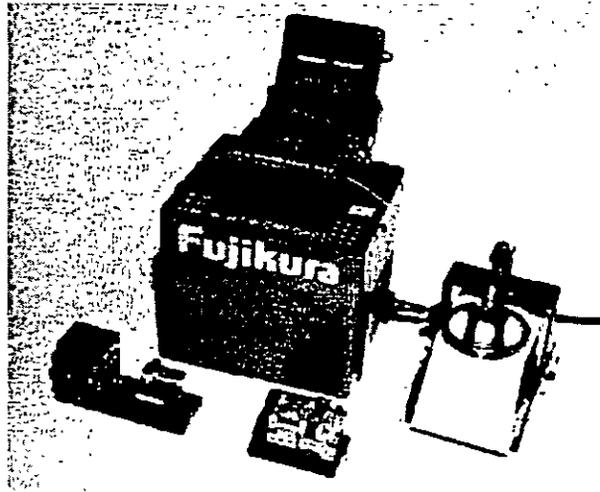
En las siguientes figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 muestran dos tipos de empalmadoras que se utilizan en las rutas de larga distancia, así como sus características de tensión.



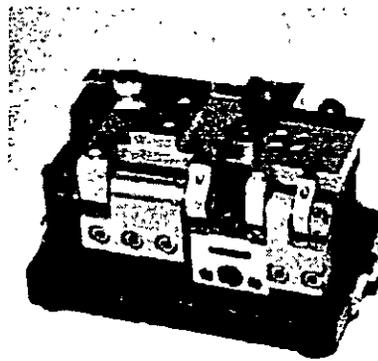
*Figura 2 Empalmadora Fujikura modelo FSM-40.*



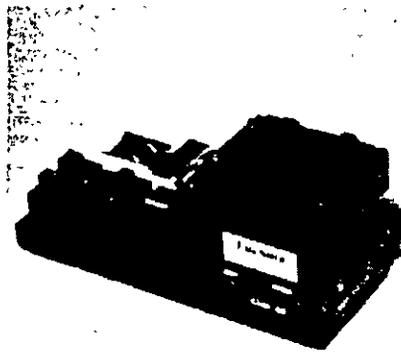
*Figura 3 Empalmadora Fujikura modelo FSM-30 PF.*



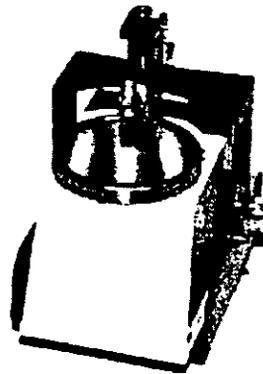
*Figura 4 Empalmadora Fujikura con accesorios de corte y sujeción de cable de fibra.*



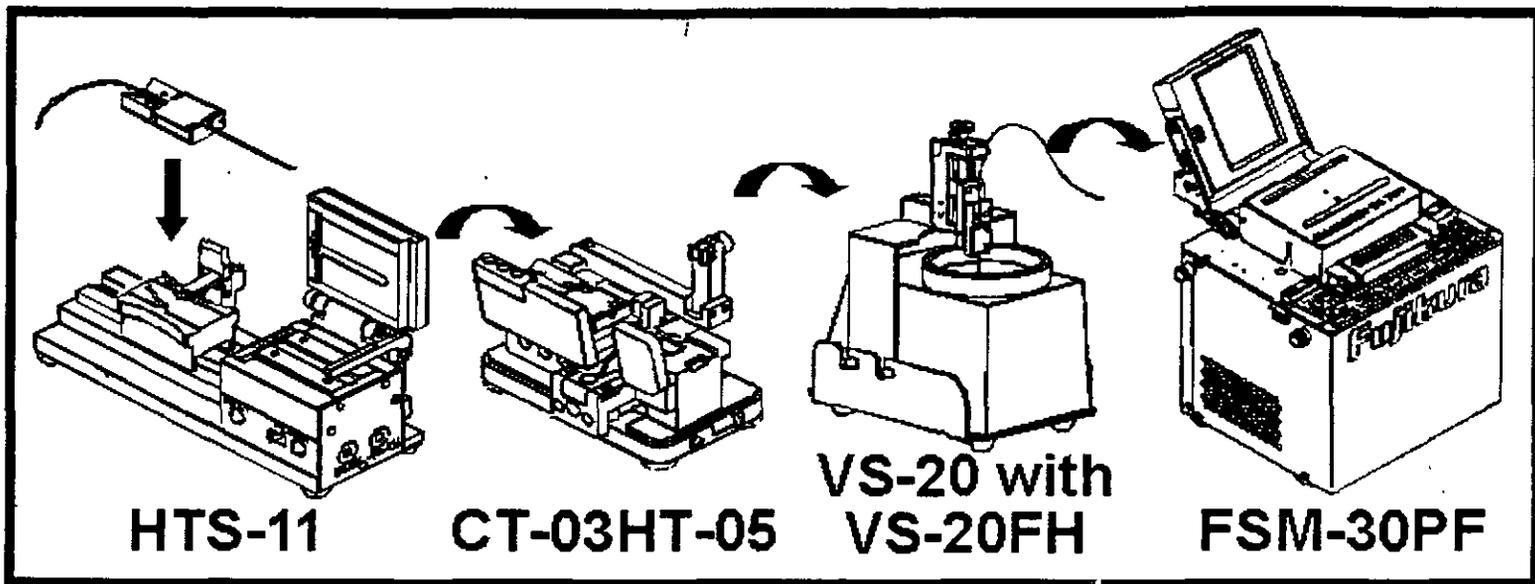
*Figura 5. Limpiadora de cubierta de fibra óptica , marca Fujikura modelo HTS-11.*



*Figura . 6 Cortadora de fibra óptica , marca Fujikura modelo CT-03HT-05.*

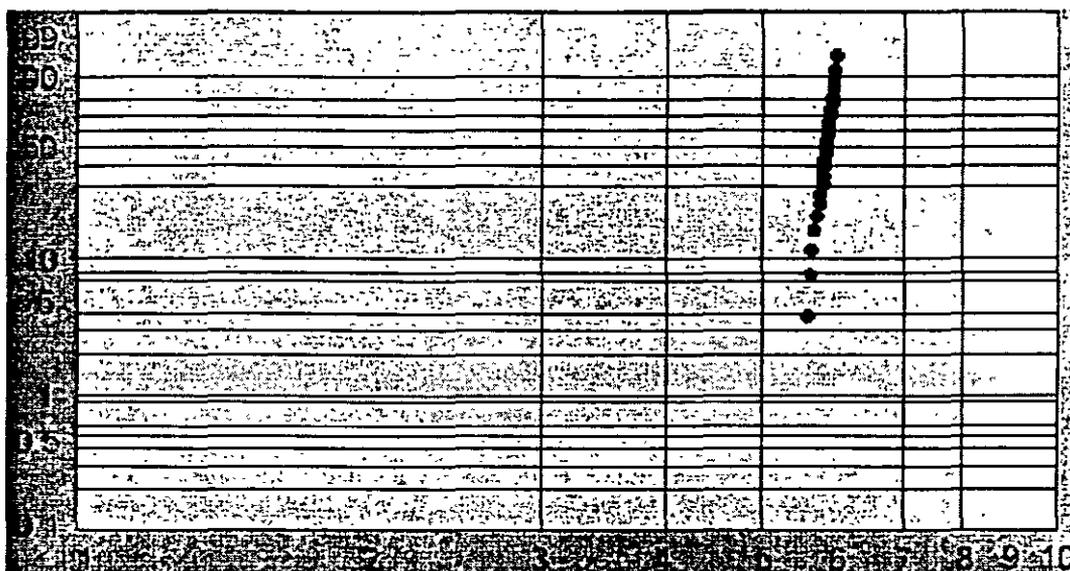


*Figura 7 Pulidora de cable de fibra óptica, marca Fujikura modelo VS-20/FH.*



*Figura 8 Vista detallada del proceso de elaboración de empalmes de fibra óptica.*

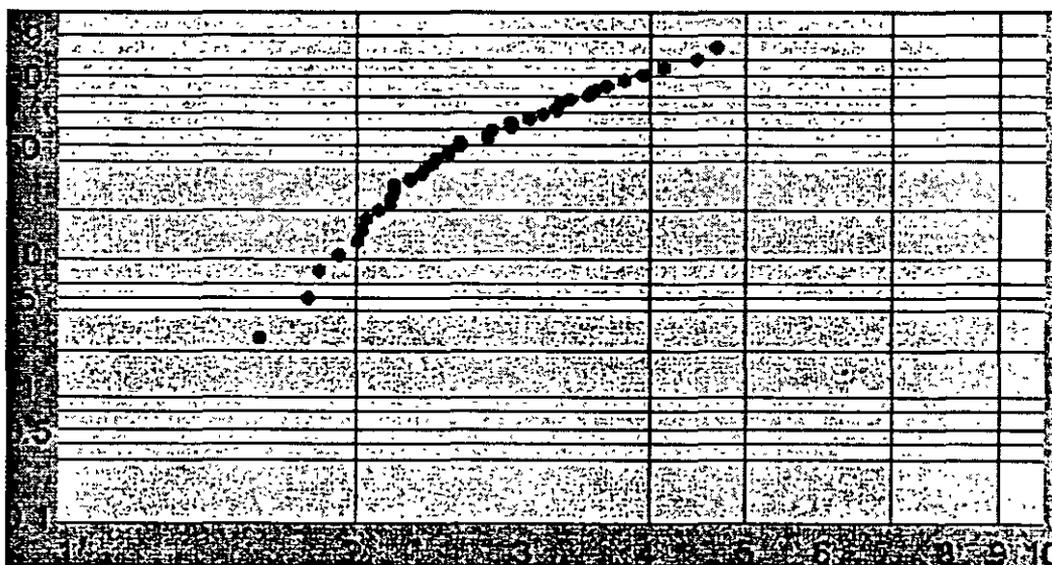
Probabilidad de ruptura[%]



Fuerza de tensión de ruptura [Gpa]

Figura 9. Fuerza de tensión realizada por la peladora HTS-11.

Probabilidad de ruptura[%]

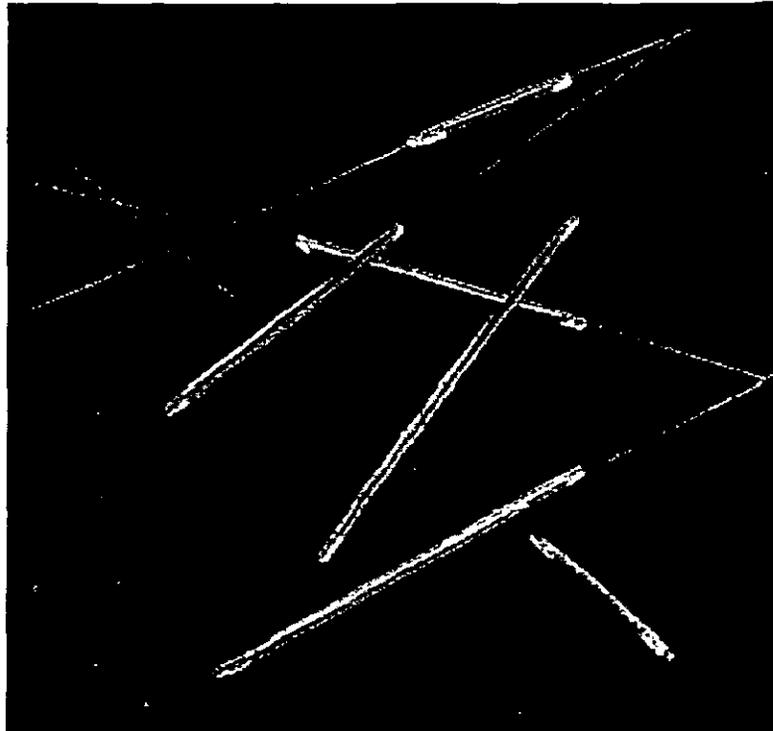


Fuerza de tensión de ruptura [Gpa]

Figura 10 Fuerza de tensión realizada por la empalmadora FSM-30PF.

---

### 1.3 Protector de empalme por fusión de fibra óptica (SMOUV).



*Figura 11 Empalmes protegidos por SMOUVs.*

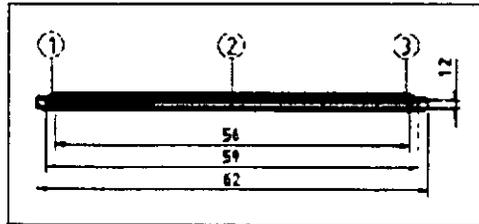
La manga protectora de empalme SMOUV-1120 provee protección mecánica y ambiental para empalmes por fusión de una sola fibra (como se muestra en la figura 11).

El SMOUV-1120 consiste de (ver figura 12):

- Cubierta clara retraible por calor
- Adesivo por fusión a baja temperatura para encapsular el empalme
- Barra de acero inoxidable para un solo empalme de fibra y una barra cerámica para encintar el empalme de fibra para asegurar una adecuada rigidez y protección.

Las mangas SMOUV-1120 para una sola fibra son ideales para la protección de empalmes de fusión de revestimiento apretado primario y secundario o semi-apretados.

SMOJV 1120-01

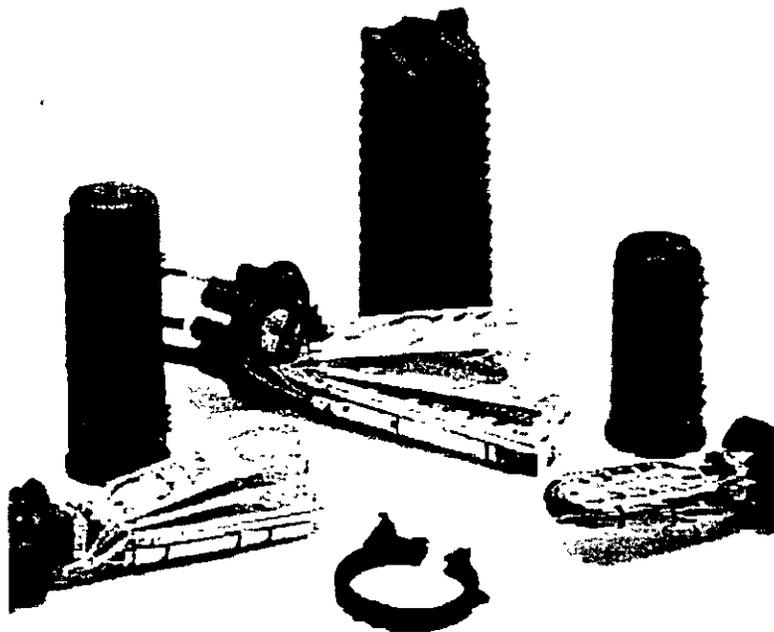


- 1.- Adesivo de fundición caliente
- 2.- Barra de acero inoxidable
- 3.- Tubo retraible por calor

*Figura 12 Componentes del SMOUV.*

---

#### 1.4 Caja de empalmes de fibra óptica Raychem modelo FOSC-400.



*Figura 13 Cajas de empalme de Raychem.*

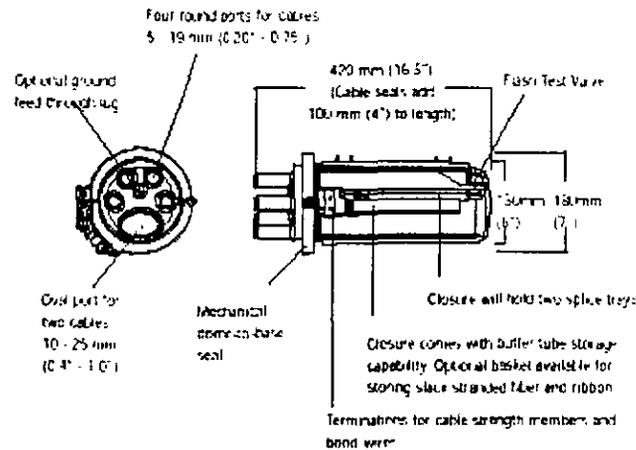
Estos encapsulados son la más nueva generación de la línea de productos de recubrimiento, ya que combinan la probada administración de fibras con un nuevo sistema de sellado. El sellado en estos FOSC 400 se hace de manera mecánica de la base al domo para una instalación y reinstalación sencilla, en el sellado del cable tiene la cualidad de tener una camisa de retracción a calor y un sistema adhesivo de fundición caliente que es instalado con una pistola de aire caliente. Para poseer una gran productividad se utilizan materiales y accesorios comunes.

Estos encapsulados están disponibles en tres tamaños: el FOSC 400 A, FOSC 400 B y FOSC 400 D (como se puede ver en la figura 13). Todos los tamaños están diseñados para construcción con cualquier cable (tubo holgado, tubo central, fibra olgada, cinta), en cualquier medio ambiente (aéreo, pedestal, enterrado, etc) y para numerosas aplicaciones de empalmes.

En los trayectos de ésta ruta se utilizaron principalmente encapsulados del modelo FOSC 00 A4, y que a continuación mencionaremos sus características principales.

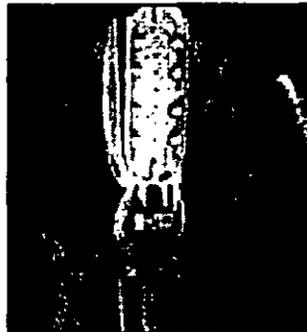
El encapsulado FOSC 400 A4 es el más pequeño de la serie FOSC 400. Es especial para pequeñas cantidades de empalmes. Este modelo ya viene listo para alojar tubos holgados, como se puede observar en la figura 14

La capacidad de empalmes del FOSC 400 A4 depende de un número de factores incluyendo la construcción del cable, tipo de empalme y longitud del "pantalon" de la fibra(ver figura 15)



**Figura 14 Elementos que componen la caja de empalme.**

Este tipo de encapsulados soporta hasta 32 empalmes por arco de fusión con hasta 8 tubos olgados.



**Figura 15 Charolas de empalme sin protección exterior.**

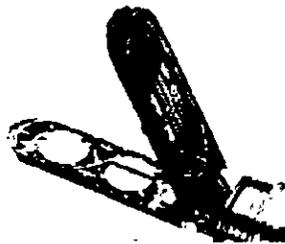
En las siguientes figuras 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, y 23 se muestra la secuencia de operación con una caja de empalmes.



*Figura 16 Disposición de los empalmes realizados dentro del contenedor de empalmes.*



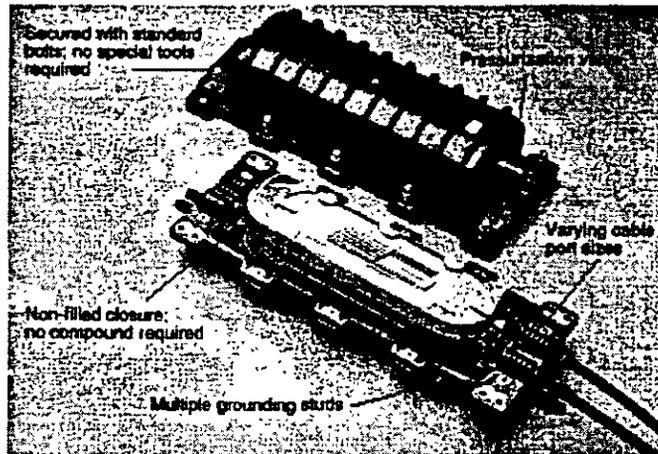
*Figura 17. Elemento de sujeción del cable de fibra en el contenedor de empalmes.*



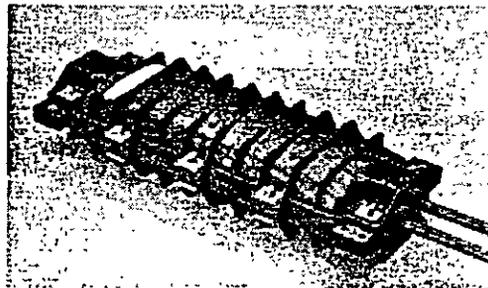
*Figura 18 Contenedor de empalmes con charolas de alojamiento de fibras ópticas.*



*Figura 19. Contenedor de empalmes con charolas de alojamiento de fibras ópticas.*



*Figura 20 Contenedor de empalmes listo para ser cerrado.*



*Figura 21 Contenedor de empalmes cerrado herméticamente.*



*Figura 22 Contenedor de empalmes en un "pozo" de pared.*



*Figura 23 Contenedor de empalmes en un "pozo" de empalmes.*

---

## 1.5 Distribuidor de fibras ópticas.

Las centrales de Larga Distancia se enlazan entre sí con cables de fibras ópticas. Debido a la atenuación que se sufre por la distancia existente entre estas centrales, cada 70 km. se utilizan regeneradores y en las centrales se utilizan cables monofibra conectorizados.

Cada fibra óptica del cable es unida a un pig-tail, el cual le permitirá conectarse a un distribuidor de señal óptica, para que este a su vez se conecte con los emisores o receptores ópticos

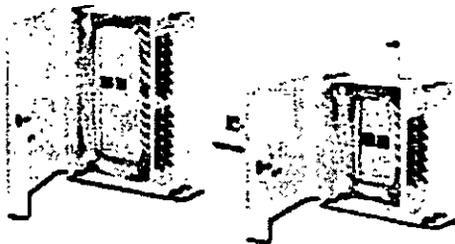
### *Preparación de Pig-Tails.*

Antes de empalmar los pig-tails con las fibras del cable es necesario prepararlos adecuadamente, esto es, quitarles la cubierta exterior, el kelvar, la cubierta primaria y posteriormente el revestimiento, una vez hecho esto, se limpia perfectamente con alcohol isopropílico para dejarla libre de grasa y polvo; una vez realizado esto, se procede como un empalme normal por fusión.

### *Terminación en Distribuidor Óptico*

Después de la preparación del cable y los pig-tails, se procede a colocar el cable en el bastidor y terminarlo en el distribuidor óptico. Así también los pig-tails se colocan en las repisas debidamente acomodados y con las curvaturas apropiadas para que no existan pérdidas por microcurvaturas y se tenga la probabilidad de tener grandes atenuaciones por los pig-tails.

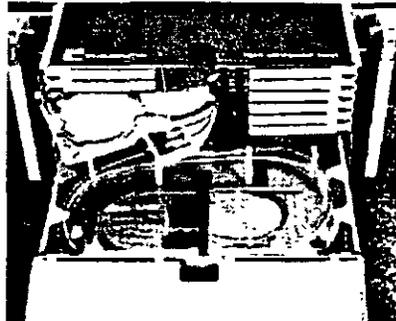
En las siguientes figuras (24, 25, 26 y 27) se muestran algunos tipos de distribuidores ópticos



*Figura 24 Distribuidor de fibras ópticas empotrado en pared.*



*Figura 25 Distribuidor de grandes cantidades de fibras ópticas en disposición de rack universal de 21".*



*Figura 26 Distribuidor de pequeñas cantidades de fibras ópticas en disposición de rack universal de 21".*



*Figura 27 Distribuidor de pequeñas cantidades de fibras ópticas con pig-tails.*

---

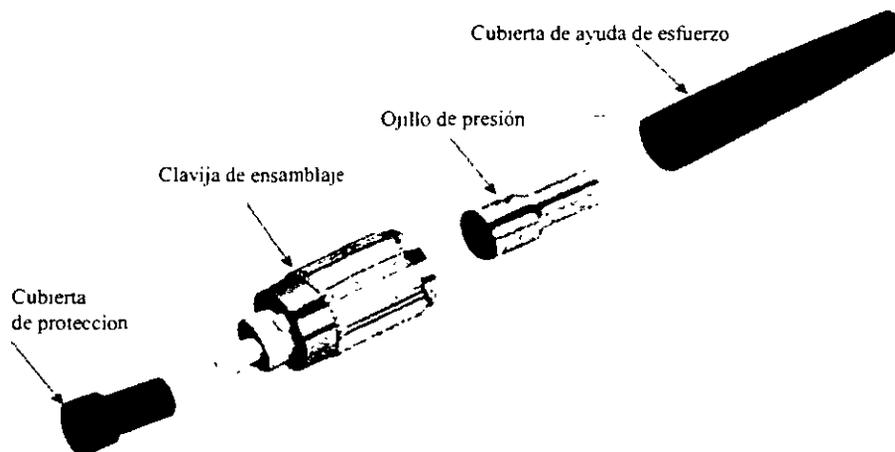
## 1.6 Conector Amphenol FC/PC.

Generalmente se utiliza éste tipo de conector, ya que cumple con las especificaciones de la NTT(Nippon Telecommunications and Telephony); además de que los diversos operadores de telefonía de larga distancia tiene estandarizado éste tipo de conectores debido a sus muy apreciables características, que dan una fiabilidad muy alta al sistema de comunicaciones.

Acontinuación se dan las características más relevantes de este tipo de conectores.

- Conector monomodo
- Cumple con las especificaciones Bellcore 326
- Ferula pre-radiada para PC( Contacto Físico) o pulidores SPC( Super Contacto Físico)
- Terminado con una cubierta de cable de hasta 3.00 mm
- Compatible con los conectores NTT-FC y conectores JIS FC
- Puede ser afinado para una mínima pérdida
- Ensambleje en campo facil
- Ferula de Zirconia Cerámica

En la siguiente figura se muestran las partes que componen un conector FC/PC.



*Figura 28 Conector FC/PC.*

---

### *Características de Desempeño*

Pérdida de inserción: 0.2 dB típico

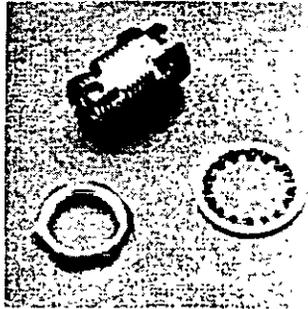
Pérdida de retorno: <-55 dB típico

Rango de temperatura de operación: -40°C a +85°C

Durabilidad:<0.2 dB/cambio después de 500 ciclos de conexión -desconexión.

Un elemento también importante es sin duda el centrador o acoplador de interfaces ópticas, en éste tipo de conexiones se utiliza también el centrador FC/PC y pueden ser de diferente presentación como se muestra en las figuras 29 y 30

#### ADAPTADORES(CENTRADORES)



*Figura 29. Centrador de montaje tipo redondo*



*Figura 30. Centrador de montaje tipo cuadrado.*

## 1. MEDICIONES EN FIBRA ÓPTICA

Los diversos métodos de medición que se aplican a la fibra óptica parten desde el control del método de fabricación de la misma fibra, en los cuales se miden diversos parámetros como son la concentricidad núcleo/revestimiento, atenuación, ancho de banda, dispersión y varios más.

Otra de las etapas de medición lo constituyen las mediciones durante la fabricación del cable, en los cuales se miden algunos de los parámetros que se obtuvieron en la fabricación de la fibra, esto es con la finalidad de comprobar que al fabricar el cable, estos parámetros no fueron alterados de forma que salgan de las normas.

Ahora bien las mediciones mencionadas anteriormente, forman parte en consecuencia de las etapas de fabricación de la fibra y el cable. En el presente trabajo estamos enfocando nuestra atención a las etapas de instalación y analizaremos pues las mediciones realizadas en estas etapas.

a) Bobina a Pie de Obra.- Las pruebas a realizar en esta fase tienen por objetivo comprobar que se ha recibido los materiales solicitados y que no han sufrido degradación durante el transporte. Para ello se realiza, a cada una de las fibras, las pruebas siguientes:

- Detección de defectos.
- Comprobaciones previas.

Estas pruebas consisten en una inspección física del cable y la verificación de la atenuación de las fibras mediante el reflectómetro (este método se detallará más adelante). Son realizadas en el almacén situado a pie de obra, por el personal responsable de la instalación.

Se ha de comprobar el buen estado de las bobinas y no se comienza la instalación si estas tuvieran algún defecto. Además se efectúa un registro de la señal retrodispersada en cada fibra, lo que da el estado de la misma sirviendo de referencia para la fase siguiente.

Los resultados de esta medición se deben comparar con los datos de la hoja técnica que el fabricante debe entregar al momento de suministrar el cable.

b) Bobina tendida.- En esta fase se comprueba que durante el tendido, el cable no ha sido sometido a fuertes tensiones que sean causa de la rotura de las fibras u otros defectos y que no existen curvaturas pronunciadas en las mismas que produzcan atenuación.

Las pruebas a realizar son:

- Detección de defectos.
- Atenuación por retrodispersión.

Nuevamente se hace una inspección física del cable y se somete a comprobación mediante el reflectómetro. En la mayoría de las ocasiones esto no se lleva a la práctica

por cuestión de tiempo, sin embargo consideramos que este es un punto importante que nos puede evitar trabajo extra, pues al efectuar esta etapa de medición podemos detectar a tiempo fallas en la instalación, que de omitirse nos podrían llevar a trabajos de revisión o corrección de algún problema.

Deben realizarse a cada una de las fibras las mediciones. Los registros han de compararse con los efectuados antes de tender la bobina, para detectar los posibles defectos de construcción o las mejores alcanzadas al perder el cable la situación de enrollamiento de la bobina, esto es detectable sobre todo en cables con fibras multimodo, ya que en este tipo de fibra la curvatura significa mayor atenuación.

- c) Empalmes.- Debido a la curvatura de los parámetros intrínsecos de las fibras, en el valor de atenuación del empalme, es preciso medir este parámetro durante su realización para comprobar que no se superan los límites establecidos.

La prueba a realizar es:

- Atenuación por retrodispersión.

Esta medida se realiza antes de colocar el tubo termocontráctil sobre el empalme, procediendo a repetirlo cuando la atenuación de este supera 0.2 dB. También se ha de repetir esta medida una vez colocados los empalmes y pigtailes (conectores finales) en la caja de empalme terminal.

Para obtener los valores de atenuación de los empalmes al momento de la ejecución, se debe establecer un circuito de comunicación entre el empalmador y un técnico que obtiene las mediciones en el extremo del cable o del enlace mediante un OTDR (Reflectómetro Óptico por Dominio en el Tiempo). Dicho circuito de comunicación puede ser improvisado utilizando el núcleo y la armadura de acero del cable o bien a través de radiocomunicación o algún otro medio.

- d) Medidas finales. Una vez que se han efectuado la totalidad de los empalmes, es preciso realizar medidas finales entre extremos del cable.

Estas son:

- Detección de defectos.
- Atenuación por retrodispersión.
- Atenuación por pérdidas de inserción.

Estas medidas se efectuarán a cada una de las fibras, en la longitud de onda en que se va a trabajar el sistema.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES**

En este apartado se describen brevemente las distintas mediciones que hemos mencionado, así como la organización del personal y los medios necesarios para efectuarlas.

## COMPROBACIONES PREVIAS

Antes de comenzar las mediciones en la bobina a pie de obra se deberá hacer la inspección física de la misma, dicha inspección física consiste en una revisión visual para comprobar su estado externo, verificando los datos de la hoja, técnica del fabricante, se observará:

- Número y tipo de fibras
- Tipo de cubierta
- Longitud de la bobina (comparando con el marcaje del cable).
- Características mecánicas del cable (peso y tensión máxima de tiro)
- Características de transmisión (atenuación, longitud de onda).

### 2.1 DETECCIÓN DE DEFECTOS DE LA FIBRA ÓPTICA

Para realizar esta medición en el almacén de cable o en campo se usa un OTDR, se sugiere instalarlo en una camioneta acondicionada especialmente para esto, la cual dispondrá en su interior de mesa con anclaje para el aparato y bandeja para elementos auxiliares. Para alimentar el equipo es necesario un generador de 110V además se precisa de las herramientas para la apertura de los pozos, protecciones y señalización.

También se realiza esta prueba en la sala de transmisión de la central telefónica donde termina el cable. En este caso es preciso disponer de una mesa a la cual se trasladará el equipo desde la camioneta. La alimentación se tomará de la red.

Para realizar esta medida son necesarios como mínimo dos técnicos para efectuar las mediciones y la preparación del extremo del cable y de las fibras a fin de empalmar o, conectorizar según se requiera.

### 2.2 ATENUACIÓN POR PÉRDIDAS DE INSERCIÓN

Como medida final se ha realizarse la medida de la atenuación total del enlace de fibra óptica, para lo que se utiliza la técnica de pérdidas por inserción.

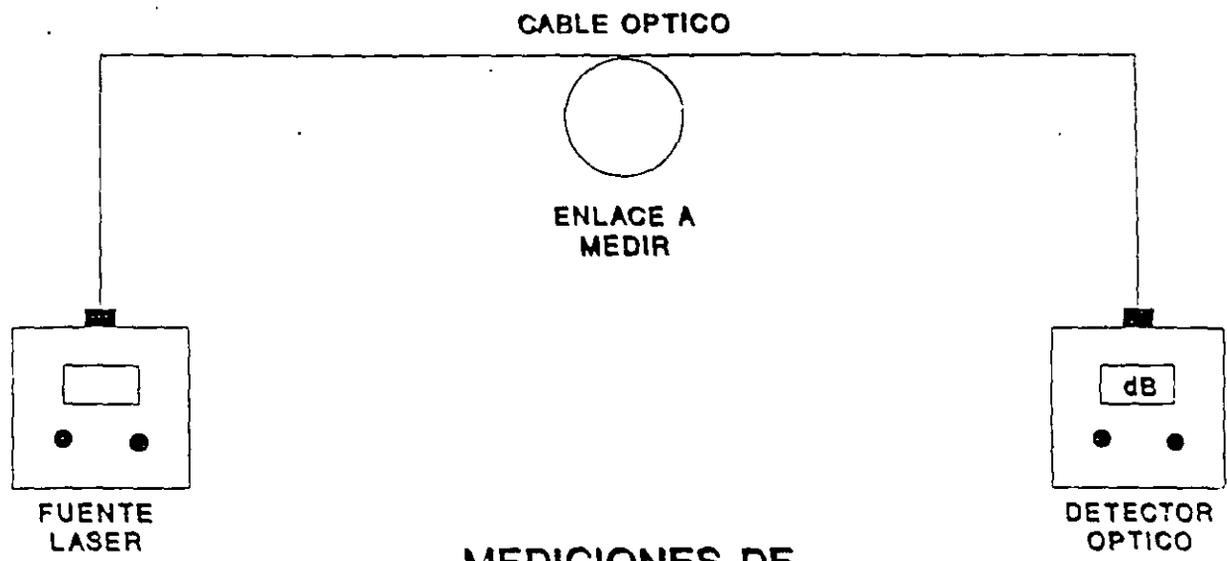
Para efectuar esta medida es preciso tener acceso a los dos extremos del cable y que entre ambos exista comunicación, por ser la última medición se contará ya con los pigtaills empalmados en ambos extremos del enlace y se tiene por lo tanto conectores, por lo que el montaje para esta prueba queda como se muestra en la figura 1.

Inicialmente se tomará una señal como referencia evaluando la potencia en un tramo de fibra con características similares a las de la fibra del enlace, dicha señal es  $P_{ref}$  posteriormente colocamos la fuente de luz en uno de los extremos del enlace y en el otro extremo colocamos el detector y tomamos la siguiente lectura que será  $P_0$ , finalmente la pérdida total del enlace está dada por:

$$\alpha = 10 \log (P_0 / P_{ref}) \text{ dB}$$

Los equipos de medición dan las lecturas de potencia en decibeles (dB), es decir, se tiene  $P_{ref}(dB)$  y  $P_o(dB)$ . Por lo tanto la atenuación total de la fibra óptica bajo prueba se obtiene por la diferencia entre  $P_{ref}(dB)$  y  $P_o(dB)$ .

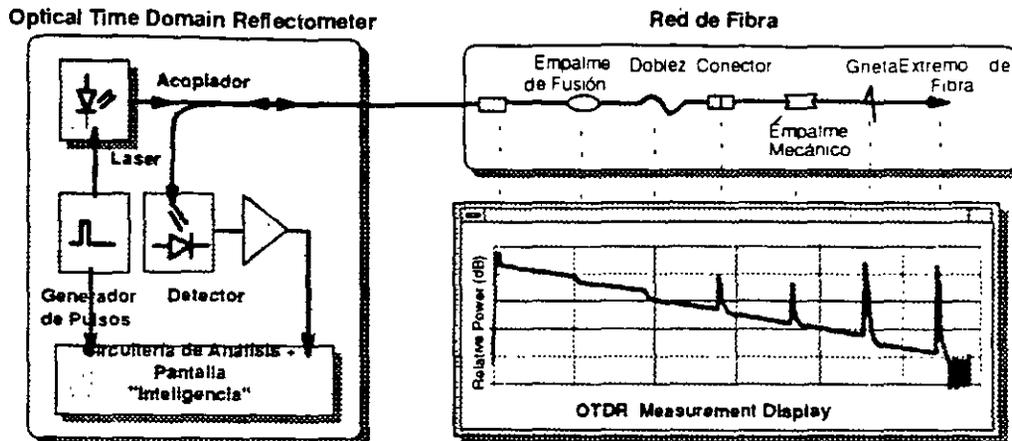
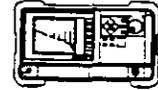
12



### MEDICIONES DE POTENCIA OPTICA

FIG. 1

# Términos Básicos - OTDR



**Los OTDR son la principal herramienta de instalación y mantenimiento en enlaces ópticos**



Óptica Instrumentos de Medida No 20  
A.L.T. / M. Oper. / m. C/Am

El OTDR es la principal herramienta para instalar y mantener enlaces de fibra óptica. Permite que se pueda medir el enlace desde un extremo.

El OTDR envía pulsos de luz a lo largo de la fibra utilizando una fuente de diodo laser. El ancho del pulso usualmente puede ser seleccionado por el usuario. Las señales con la información de los eventos del enlace y de la fibra misma regresan al OTDR. Esta señal es enrutada a través de un acoplador hacia el receptor, donde la señal de luz es convertida en una señal eléctrica y finalmente analizada y desplegada en la pantalla del equipo.

El OTDR mide la señal de retorno contra el tiempo. Los valores del tiempo se multiplican por la velocidad de la luz en la fibra para calcular la distancia. Por lo tanto el OTDR muestra la potencia relativa de la señal de retorno contra la distancia. Con esta información se determinan las características importantes del enlace:

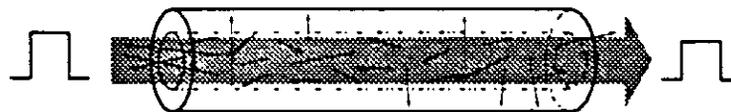
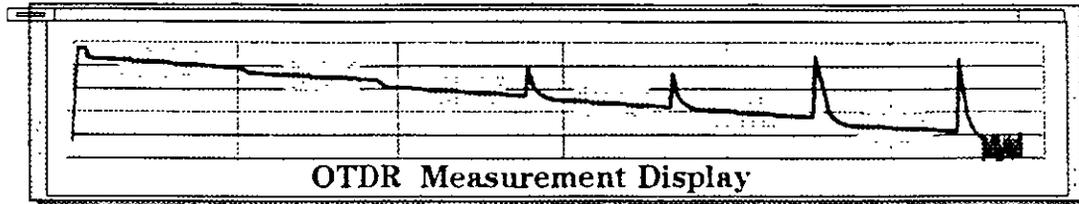
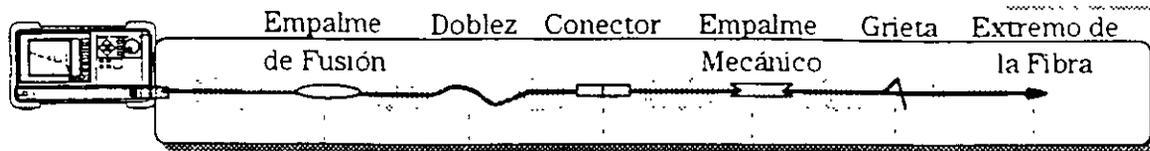
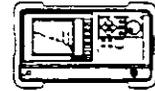
- Distance: El lugar donde se encuentran las ocurrencias de los eventos y el final de la fibra
- LOSS: Puede ser la pérdida en un empalme ó la pérdida total entre los extremos del enlace
- ATTENUATION: De la fibra en el enlace
- REFLECTION: El tamaño de la reflexión (ó pérdida por retorno) de un evento, tal como un conector

Durante la instalación, se usa el OTDR para asegurarse que los empalmes y los conectores tengan poca pérdida (y poca reflexión en la mayoría de los casos), que las pérdidas no sean inducidas por doblar ó estirar la fibra y finalmente que la pérdida total del enlace esté dentro de lo especificado.

Para mantenimiento, el enlace puede ser revisado periódicamente con un OTDR para verificar que no haya ocurrido ninguna degradación en el enlace. Si el enlace se encuentra interrumpido (el cable cortado accidentalmente por ejemplo) se puede usar el OTDR para localizar la falla a reparar.

Esta figura muestra como un OTDR despliega en la pantalla, la medición en un enlace que contiene cada uno de los eventos más comunes que se pueden presentar. En las siguientes páginas se examinarán con mayor detalle cada uno de estos eventos.

## Términos Básicos - Backscatter



Backscatter es una pequeña parte de la dispersión de Rayleigh que regresa al OTDR

HEWLETT  
PACKARD

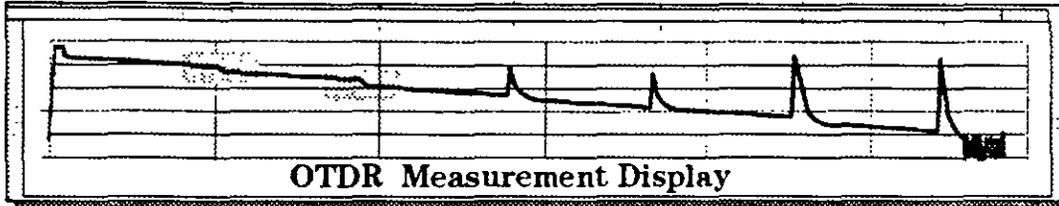
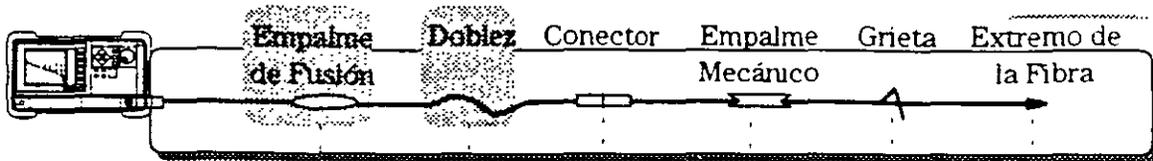
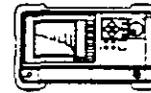
OTDR Measurement Display

Los OTDR's reciben y despliegan no solo las señales producto de los eventos, sino también señales producto de la fibra misma. Esta señal proveniente de la fibra se conoce como backscatter.

A medida que la luz viaja a través de la fibra, se ve atenuada por un efecto conocido como Rayleigh scattering. Esto es ocasionado por pequeños cambios en el índice de refracción del vidrio. Esto ocurre continuamente a todo lo largo de la fibra. Una parte de la luz dispersada se dirige de vuelta al OTDR. Esto es lo que se conoce como backscatter. El receptor de un OTDR se construye de manera de que sea muy sensible para que sea capaz de detectar señales tan pequeñas (típicamente 40 a 80 dB por debajo de la señal enviada).

Es muy importante que el OTDR sea capaz de medir el backscatter, debido a que los cambios en el nivel de backscatter determinan la pérdida de los eventos a lo largo del enlace.

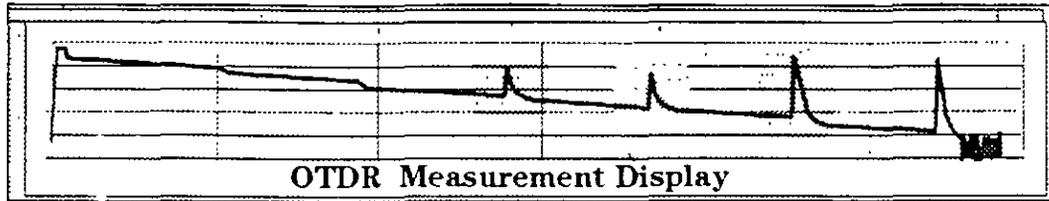
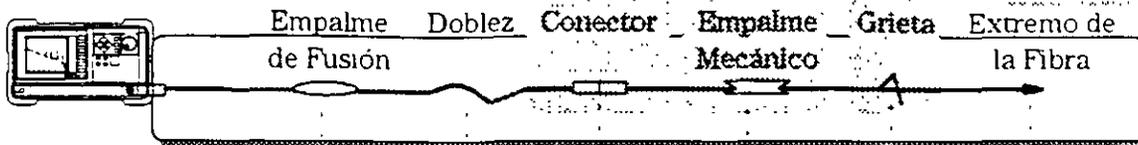
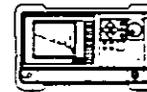
# Términos Básicos - Eventos No-Reflectivos



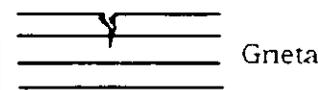
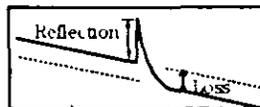
Los empalmes de fusión y los dobleces causan pérdidas pero no reflexiones. Sus respuestas son similares en la pantalla del OTDR.

Los empalmes de fusión y los dobleces en la fibra producen pérdidas , pero generalmente no causan reflexiones . En la pantalla del OTDR aparecen como una caída repentina en el nivel de backscatter. Este cambio vertical constituye la pérdida del evento.

# Términos Básicos - Eventos Reflectivos



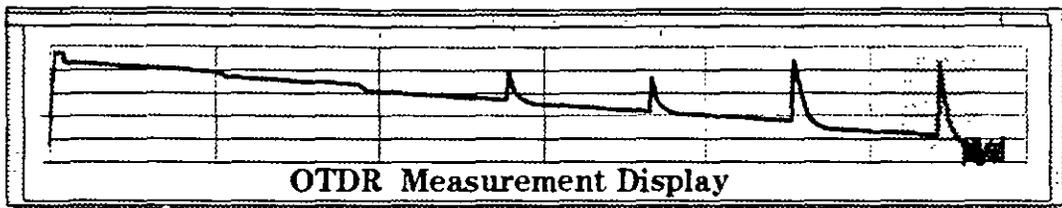
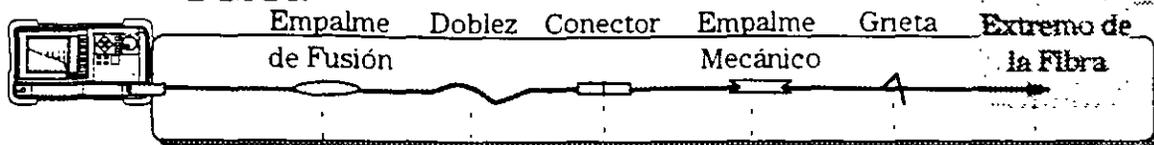
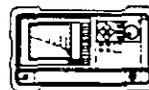
Empalme Mecánico  
ó Conector



**Los empalmes mecánicos, los conectores y las grietas causan reflexiones y pérdidas. Sus respuestas son similares en la pantalla del OTDR**

Los empalmes de fusión y los dobleces en la fibra producen pérdidas, pero generalmente no causan reflexiones. En la pantalla del OTDR aparecen como una caída repentina en el nivel de backscatter. Este cambio vertical constituye la pérdida del evento.

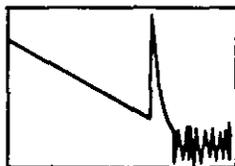
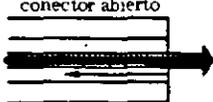
# Términos Básicos - Extremo de la Fibra



(Reflexivo)

(No-Reflexivo)

Pulido ó con un conector abierto



Extremo de la fibra roto



Existen dos casos para identificar el final de la fibra.

Primero, si la fibra ha sido cortada a una cara perpendicular ó se le ha instalado un conector (conectado, pulido), se producirá una reflexión de un 4%, comunmente conocida como reflexión de FRESNEL.

Segundo, si el final de la fibra está quebrado, es posible que la irregularidad de su superficie disperse la luz y no produzca reflexión. En este caso la señal en la pantalla simplemente cae del nivel de back-scatter al nivel de ruido del OTDR. Sin embargo es posible que un final quebrado produzca una reflexión, probablemente no tan grande como un final cortado ó el de un conector.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**TRANSMISORES ÓPTICOS**

**CONFERENCISTA  
DR. HORACIO SOTO RODRÍGUEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**



# DISPOSITIVOS DE SEMICONDUCTOR EMISORES DE LUZ

( PRIMERA GENERACION )





## Plan de la exposición

Unión de semiconductor n-p

Nivel de Fermi

Unión de semiconductor n-p polarizada

LED

LASER

Ecuaciones de evolución de un LASER





## Plan de la exposición

Resonador Fabry-Perot (Primera generación)

Reflector de Bragg

Láser DFB (Segunda generación)

Láser DBR (Segunda generación)

Láser VC (Tercera generación)

Ruido de los láseres

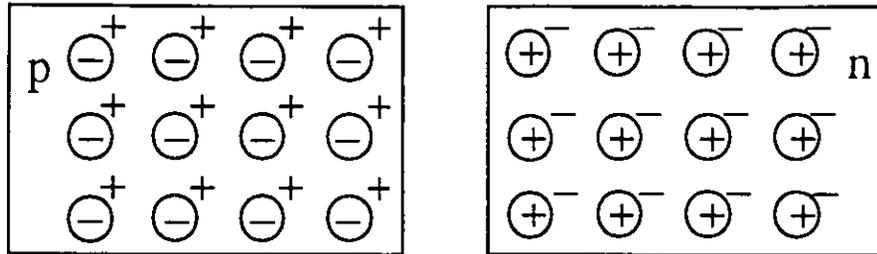
Modulación de los láseres

Chirp de la Modulación

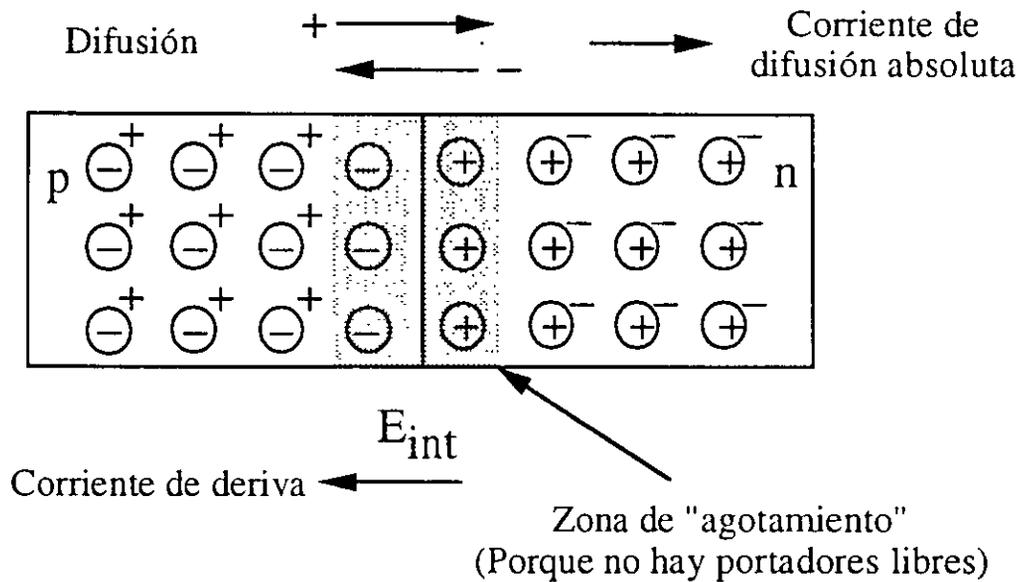
Presentación de diferentes láseres



## Semiconductores contaminados



## Unión de semiconductor



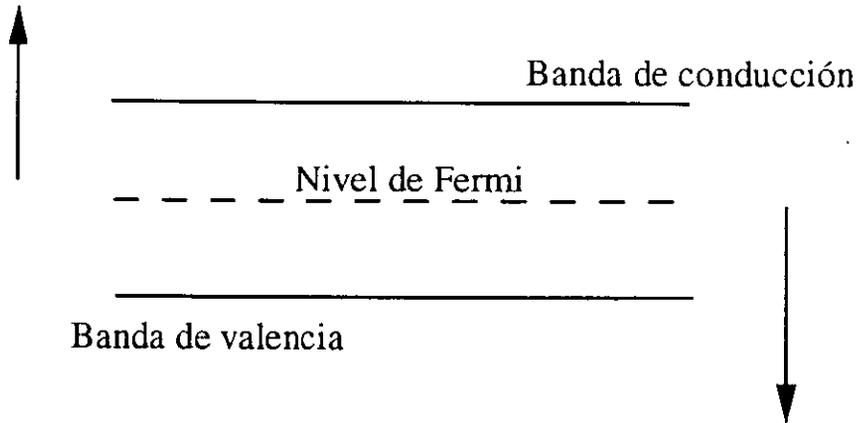
La partida de los huecos del lado "p" deja atrás aceptores cargados negativamente, lo que genera una zona de carga espacial negativa. Similarmente, la difusión de los electrones del lado "n" al lado "p" deja atrás una zona de carga espacial cargada positivamente en el lado "n".

Las zonas de carga espacial generan un campo eléctrico  $E_{int}$  que produce una corriente de deriva en dirección opuesta a la corriente de difusión.



## Relación del Nivel de Fermi y los Estados Cuánticos

Por arriba del nivel de Fermi todos los estados cuánticos están vacíos



Por debajo del nivel de Fermi todos los estados cuánticos están llenos

## Inversión de población en una unión p-n contaminada fuertemente

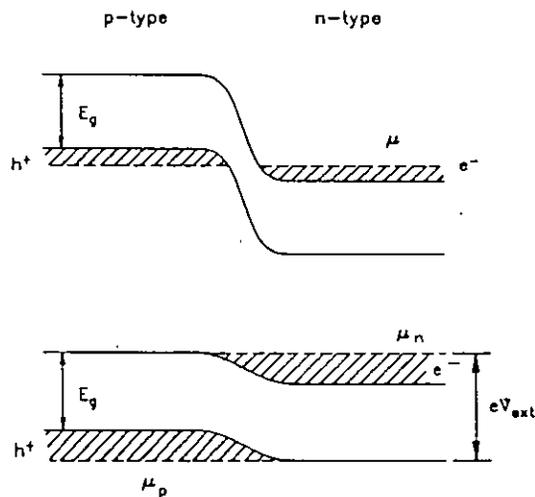


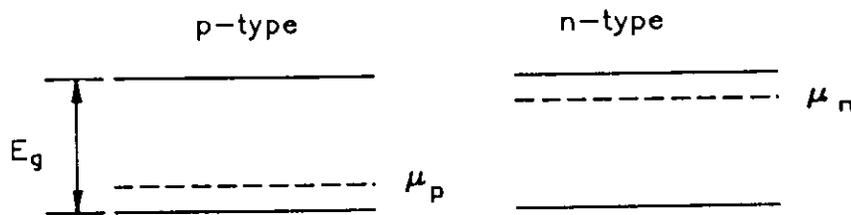
Figure 17.11. (a) The band diagram for a heavily doped p-n junction at equilibrium before applying the voltage and (b) after the voltage is applied.



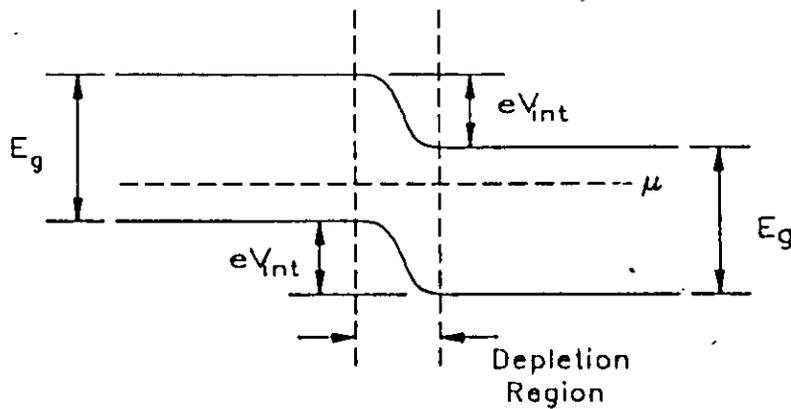
Entonces en el equilibrio térmico:

$$\text{Corriente total} = \text{corriente de difusión} + \text{corriente de deriva} = 0$$

### Esquema de las bandas para los semiconductores "n" y "p" antes de estar en contacto

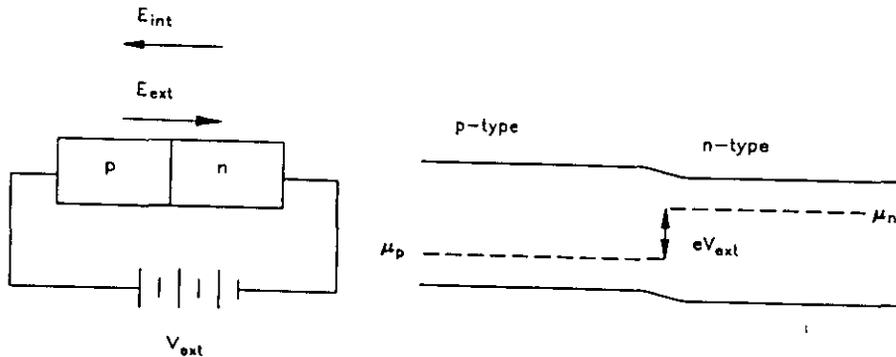


### Esquema de las bandas para la unión p-n



## Unión p-n polarizada en directa

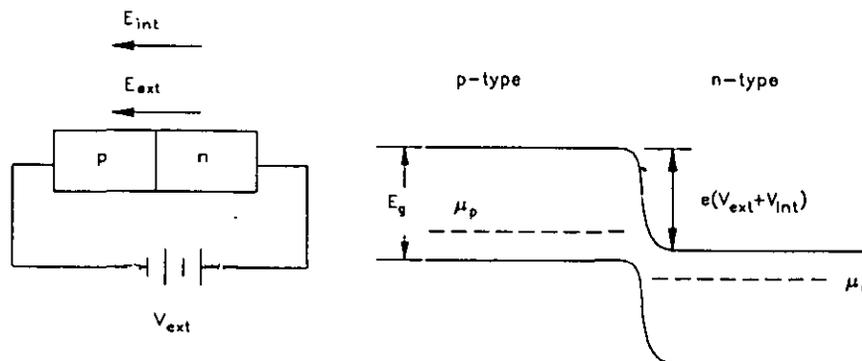
Si la unión es polarizada en "directa," la "altura" del potencial creado es reducida puesto que el campo externo se encuentra en dirección opuesta al campo interno  $E_{int}$



El potencial externo aplicado rompe el equilibrio y los portadores mayoritarios cruzan la unión produciéndose una corriente. (Como el equilibrio térmico se ha perdido, no se tiene mas un sólo nivel de Fermi, ahora hablamos de un casi-nivel de Fermi)

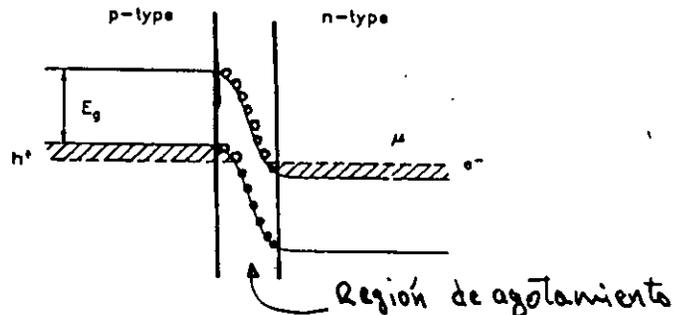
## Unión p-n polarizada en inversa

Para una polarización inversa, el potencial de barrera incrementado previene el flujo de portadores mayoritarios

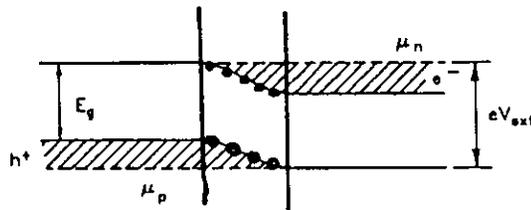


## Diodo Emisor de Luz

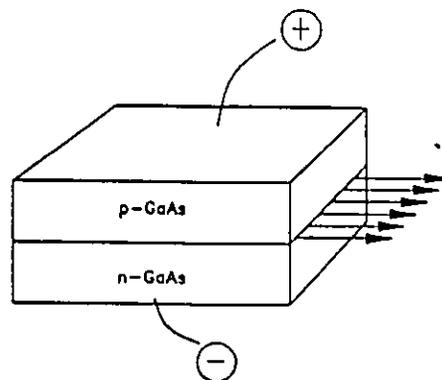
En una unión p-n la concentración de los contaminantes puede ser incrementada de manera que el nivel de Fermi en la región "n" se ubique por arriba de la banda de conducción, y el nivel de Fermi en la región "p" se ubique por debajo de la banda de valencia.



La polarización en directa de esta unión p-n contaminada fuertemente tiene como consecuencia la inyección de electrones y de huecos en la región de "agotamiento", dando lugar a una inversión de población.

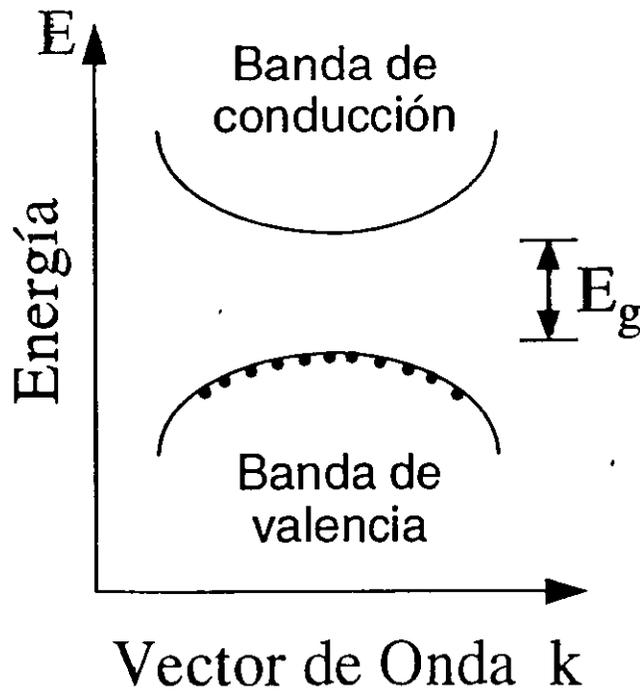


En la región de agotamiento, también conocida como la región activa, los electrones y los huecos se recombinan radiativamente, emitiendo su exceso de energía en forma de luz. Un tal dispositivo es llamado Diodo Emisor de Luz o LED.

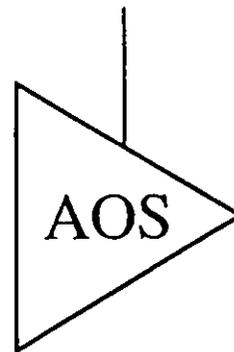


# Modelo de bandas parabólicas

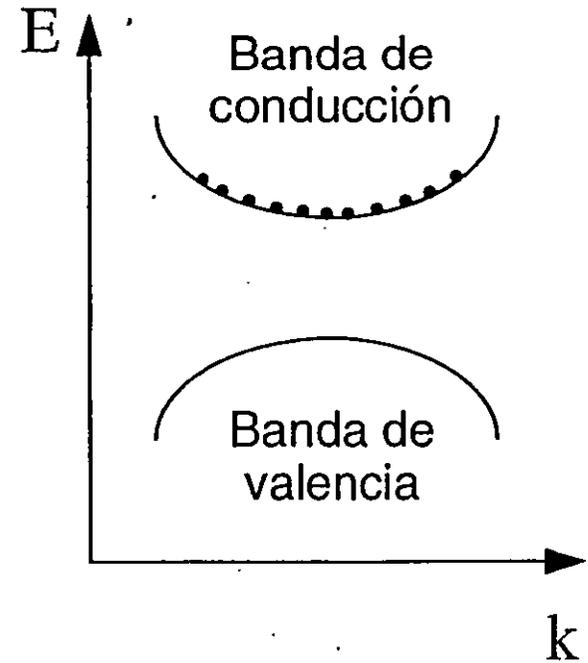
Equilibrio térmico



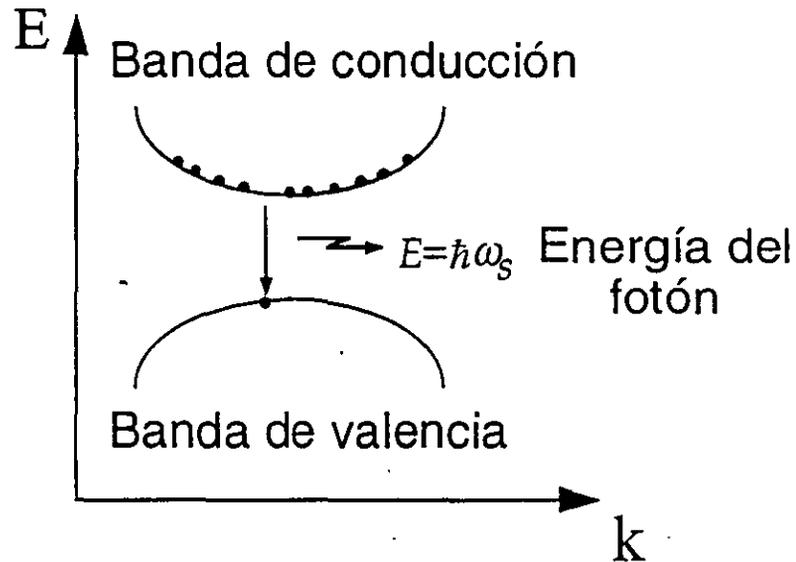
Corriente



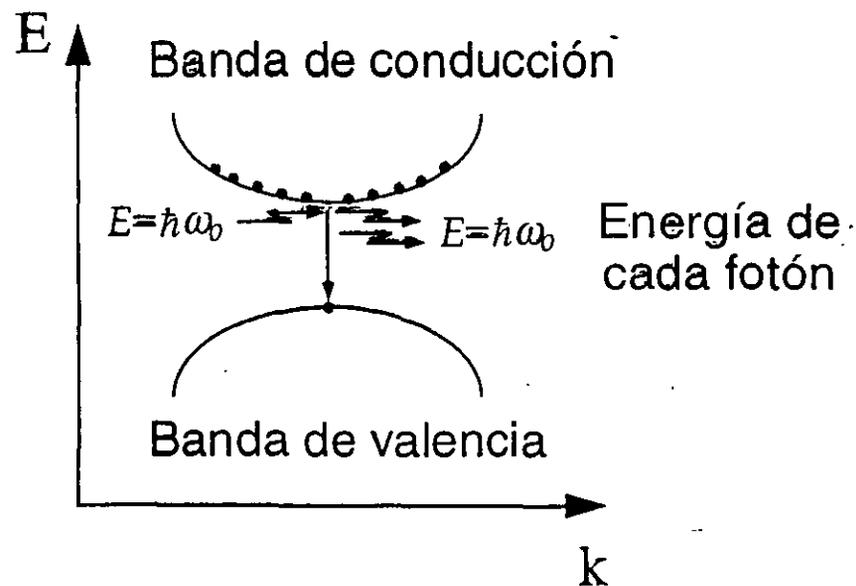
Inversión de población



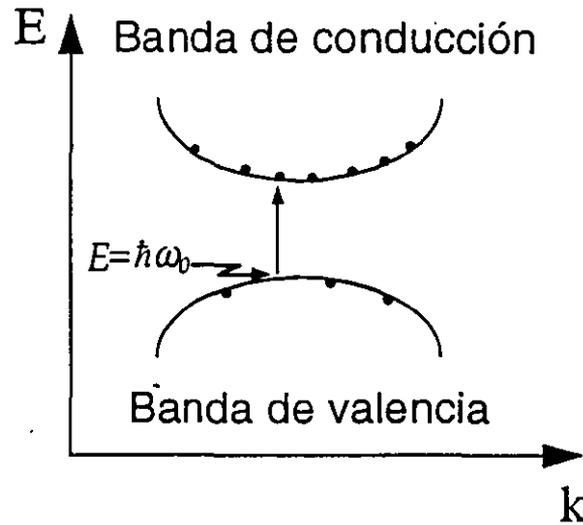
# Emisión espontánea



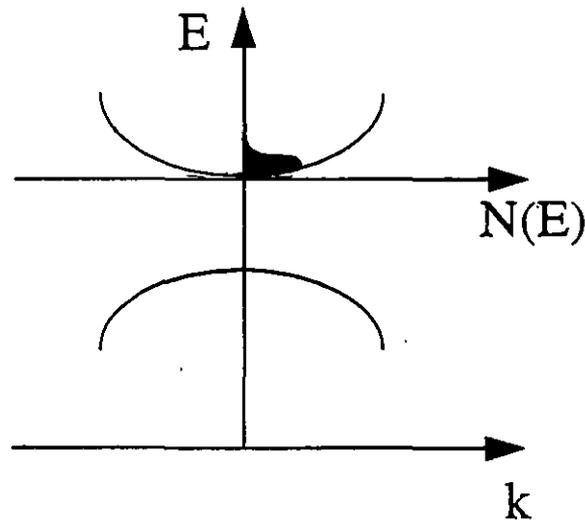
# Emisión estimulada



# Absorción



## Densidad de portadores



## Ganancia(N)



Material	Band energy spacing (eV)	Wavelength at 300 K ( $\mu\text{m}$ )	Radiation equivalent (Lm/W)	Radiation range	Transition type
Ge	0.66				Indirect
Si	1.09				Indirect
SiC	2.5	0.496	200	Blue	Indirect
InSb	0.18	6.9		IR - C	Direct
InAs	0.36	3.45		IR - C	Direct
GaSb	0.7	1.77		IR - B	Direct
InP	1.26	0.985		IR - A	Direct
GaAs	1.38	0.898		IR - A	Direct
GaAsP	1.90	0.65	70	Red	Direct
GaP	2.19	0.565	590	Green	Indirect
GaP	1.8	0.69	5.5	Red	Indirect
GaN	3.1	0.4	0.3	Violet	Indirect

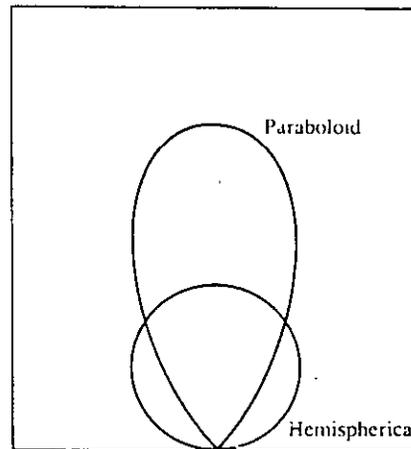
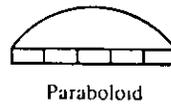
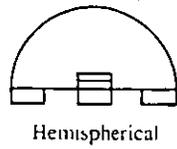
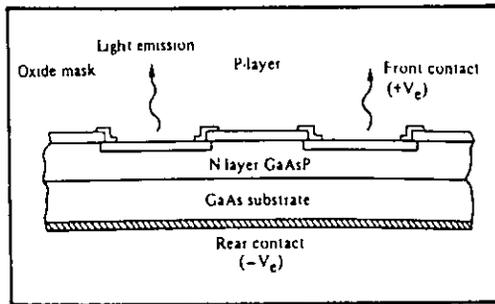
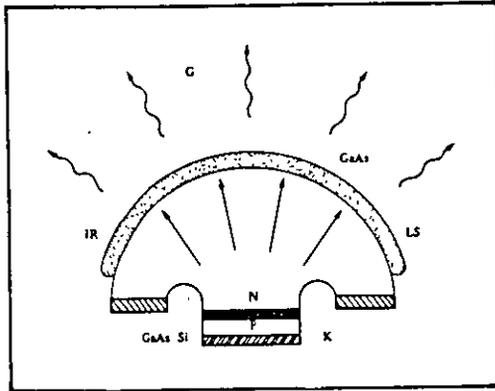
*GaSb = Antimonio de Galio*

*GaN = Nitrato de Galio*

*GaP = Fosforo de Galio*

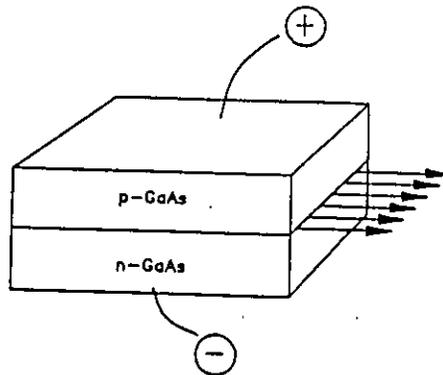
*SiC = Carburo de Silicio*





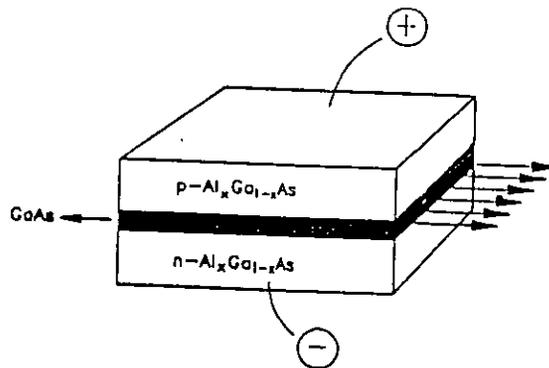
## Láser homounión

Las regiones "n" y "p" son del mismo material, (como GaAs) y la región activa es la región de agotamiento con un espesor de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$ . Las extremidades están clivadas produciendo una reflectividad de 0.3 que provee la retroalimentación óptica necesaria para la acción láser. El problema es que su eficiencia es muy baja debido a la pérdida de fotones y portadores en la región activa.

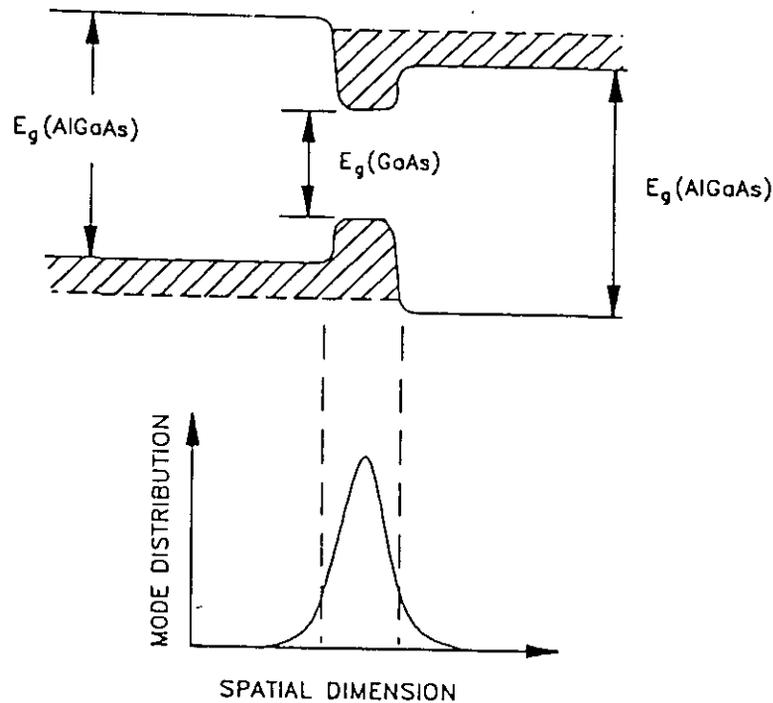


## Láser de doble heterounión (Láser DH)

Tienen la ventaja de confinar a los portadores en la región activa, la cual funciona además como una guía de onda óptica. En estos láseres la región activa es una delgada capa de GaAs de un espesor inferior a  $0.1 \mu\text{m}$  colocada entre dos capas de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , una contaminada con contaminante "p" y la otra con contaminante "n".



La más grande energía prohibida (o del gap) del AlGaAs con respecto a la del GaAs, propicia un confinamiento de portadores en la región activa.

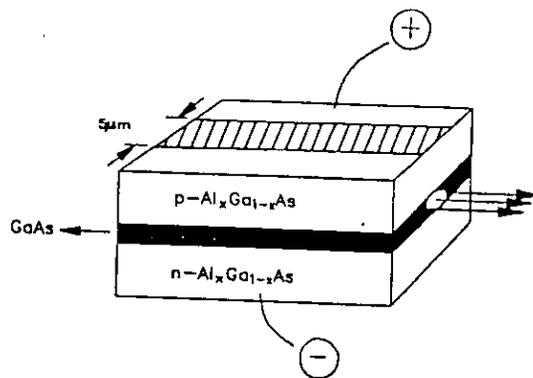


Además, el índice de refracción del GaAs es más grande que el del AlGaAs, lo que confina la radiación emitida dentro de la región activa (capa de GaAs). Con esto se consigue que la radiación no se pierda en el medio que rodea a la región activa, puesto que ahora esta radiación es guiada.

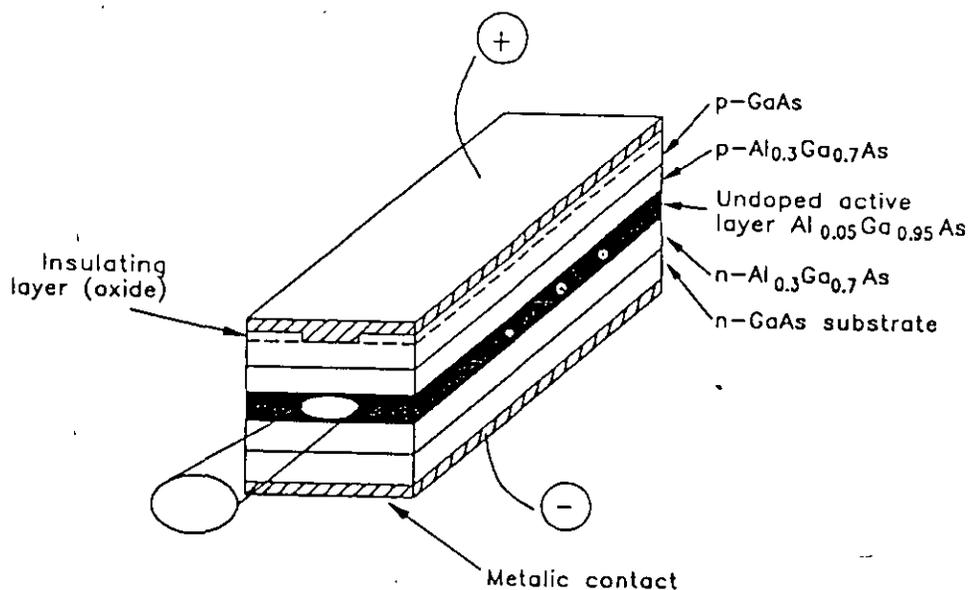


## Láser DH con micro-cinta y/o Estructuras guiadas por ganancia

En esta estructura el potencial externo es aplicado únicamente en una micro-cinta, lo que produce que la inversión de población y la acción láser se originen únicamente en una zona angosta de la región activa. Esto aumenta la densidad de portadores inyectados y por lo tanto la eficiencia del dispositivo.

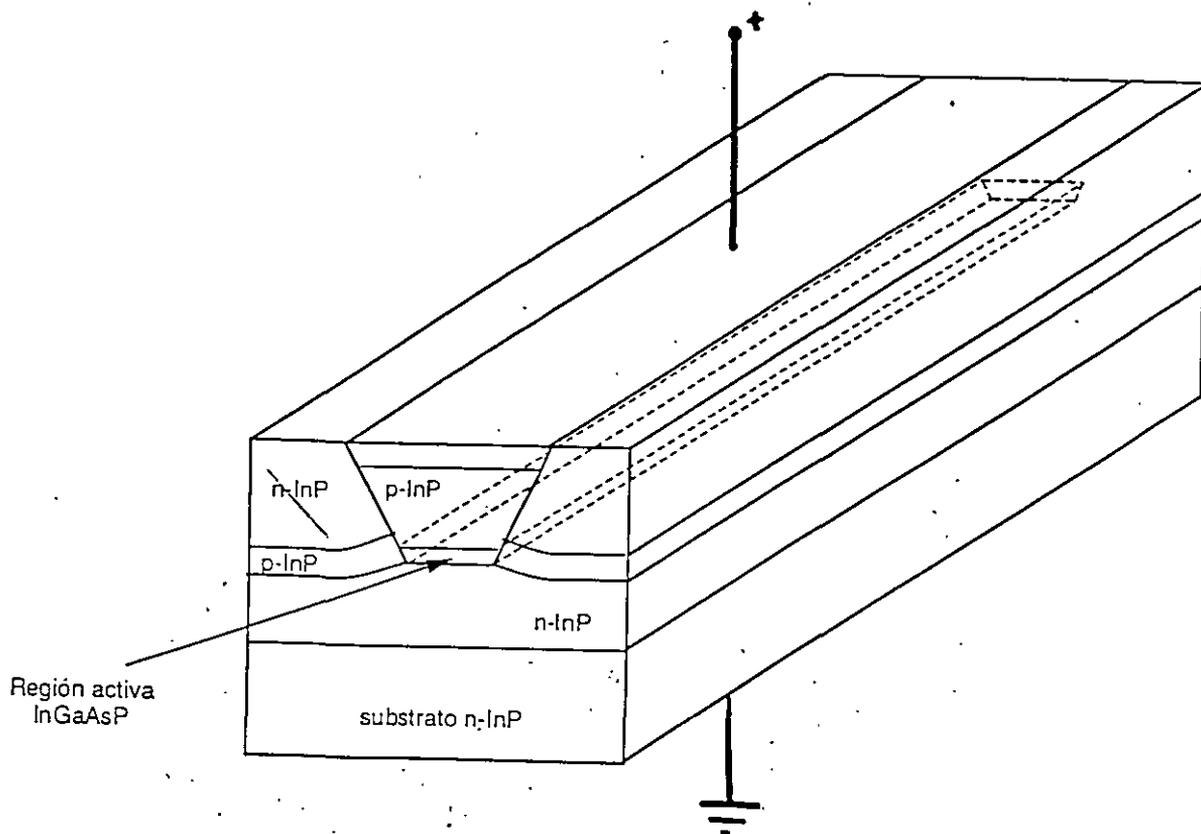


A esta geometría se le conoce también como estructura guiada por ganancia, ya que no contiene estructuras laterales y la ganancia óptica es restringida lateralmente por el ancho de la micro-cinta, lo que además restringe el modo lateral del láser.

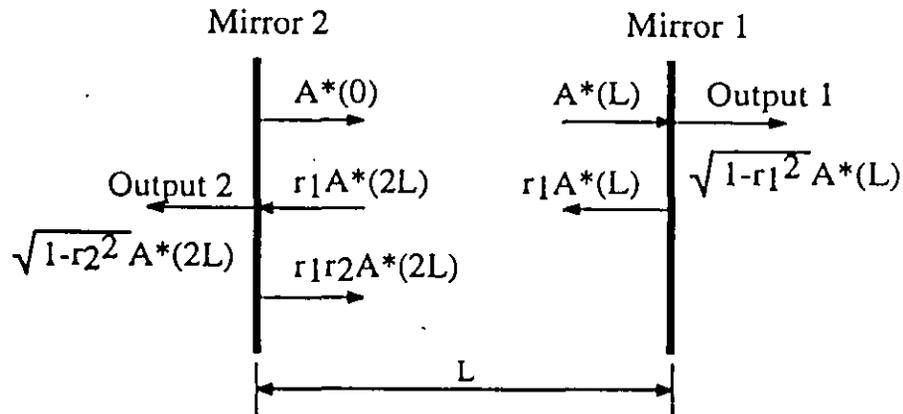


## Estructuras guiadas por índice

Por otra parte, hay estructuras que se dice son guiadas por índice, donde la región activa es un angosto "canal" rodeado completamente por materiales de diferentes composiciones que presentan un índice de refracción pequeño. La diferencia en índice de refracción de la región activa y el medio que la rodea, produce una guía de onda que confina la luz. A esta estructura se le conoce también como láser enterrado.



## Resonador Fabry-Perot



Para el análisis, primero consideramos una onda plana óptica viajando del lado izquierdo al lado derecho dentro del resonador. Su campo eléctrico es dado por:

$$E(t, x) = A \exp\left(-\frac{\alpha_s x}{2}\right) \exp[j(\omega t - \beta x)]$$

donde  $A$  es la amplitud del campo en el espejo izquierdo,  $\alpha_s$  es la atenuación en intensidad,  $x$  es la distancia partiendo del espejo izquierdo,  $\omega$  es la frecuencia óptica y  $\beta$  es la constante de propagación.

La amplitud compleja del campo en el punto  $x$  es dada por:

$$A^*(x) = A \exp\left(-\frac{\alpha_s x}{2}\right) \exp(-j\beta x)$$



**CICESE** La repercusión de la condición de fase es más clara, si se recuerda que la constante de propagación esta definida como:

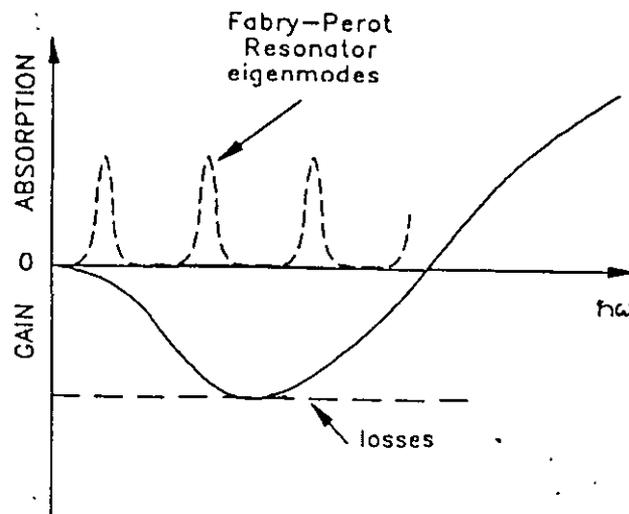
$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$$

donde  $n$  es el índice de refracción, y  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío.

Substituyendo esta expresión dentro de la anterior se obtienen los valores de las longitudes de onda que satisfacen la condición de fase:

$$\lambda = \frac{2Ln}{m}$$

Como puede apreciarse, hay un numero infinito de longitudes de onda, o dicho más propiamente de modos que cumplen con esta condición. Sin embargo, los modos que cumplen con la condición de ganancia son muy pocos, generalmente son aquellos cuya longitud de onda se encuentra muy cercana a la del pico de la curva de ganancia.



Así para que haya una oscilación estable que de lugar a una oscilación láser (luz coherente), es necesario que la longitud de onda del modo oscilante cumpla con la condición de fase y que al mismo tiempo la ganancia en esta longitud de onda cumpla con la condición de amplitud.



## Separación entre modos

Para encontrar la separación frecuencial que existe entre los modos de la cavidad, la última ecuación es escrita de la manera siguiente:

$$m = \frac{2Ln}{\lambda_m} = \frac{2Ln}{c} f_m$$

donde  $\lambda_m$  y  $f_m$  son la longitud de onda y la frecuencia del emesimo modo.

Similarmente para el modo  $(m-1)$ :

$$m - 1 = \frac{2Ln}{\lambda_{m-1}} = \frac{2Ln}{c} f_{m-1}$$

Substrayendo estas dos últimas ecuaciones se obtiene que:

$$1 = \frac{2Ln}{c} (f_m - f_{m-1}) = \frac{2Ln}{c} \Delta f$$

donde  $\Delta f$  es la separación frecuencial entre dos modos adyacentes y por lo tanto:

$$\Delta f = \frac{c}{2Ln}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$$

son los "espaciamientos" en frecuencia y en longitud de onda entre modos. De estas expresiones es claro que el espaciamento entre modos solamente depende de la longitud del resonador y del material.

Evidentemente todo este análisis ha sido realizado únicamente para los modos longitudinales de la cavidad. Los modos transversales no han sido tomados en cuenta porque generalmente las dimensiones de la cavidad son diseñadas para que exista solamente un modo en la longitud de onda de interés.



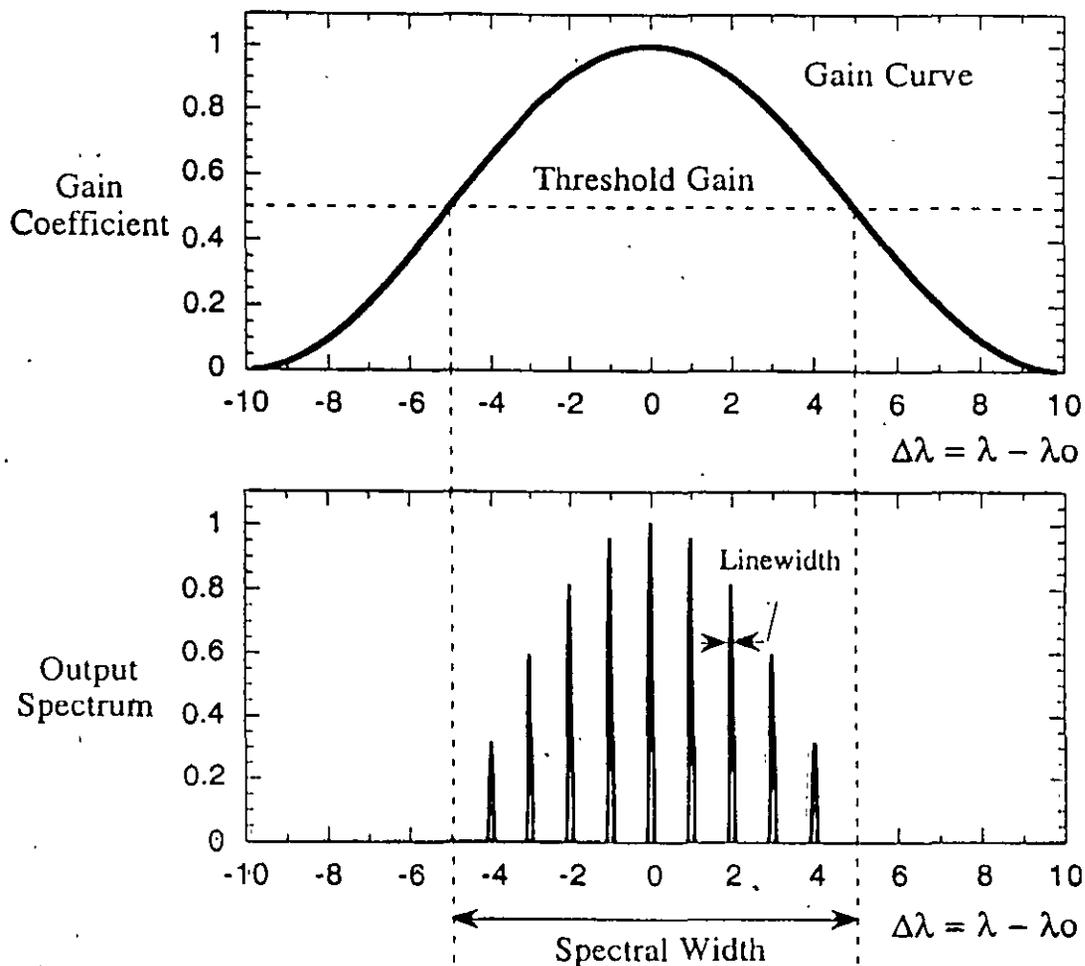
CICESE

## Resumen de los elementos y parámetros que permiten la radiación láser

- Una guía de onda óptica para vehicular la luz generada. Con el fin de soportar un solo modo transversal, el espesor y el ancho de la guía deben ser muy pequeños.
- Un medio amplificador utilizado para realizar la región activa. La ganancia es producida por la emisión estimulada que toma lugar cuando una onda óptica viajando a través de la guía de onda óptica, interactúa con los electrones de la banda de conducción del medio activo que la conforma. Para que esto pueda suceder, es necesario que el medio amplificador presente una inversión de población, la cual es lograda a través de un bombeo eléctrico.
- Una retroalimentación óptica para crear las oscilaciones láser. En el caso simple de un láser con resonador Fabry-Perot, la retroalimentación es provista por la reflexión que la luz sufre en los dos extremos de la cavidad. Estas reflexiones son producidas por la diferencia en índice de refracción que observa la luz al pasar del semiconductor ( $n=3.3$ ) al aire ( $n=1$ ).
- Una selectividad de frecuencias de emisión. En el caso simple de un láser Fabry-Perot, la única selección se realiza a través de los modos que cumplen simultáneamente con las condiciones de ganancia y fase.

## Espectro de salida (Ancho Espectral y Ancho de Linea)

El ancho de la curva de ganancia es determinado por el semiconductor utilizado, mientras que el espaciamiento entre modos longitudinales es determinado por la longitud de la cavidad. Debido a que el ancho de la curva de ganancia es mucho mayor que el espaciamiento entre modos, los láseres Fabry-Perot pueden lasar en varios modos longitudinales.

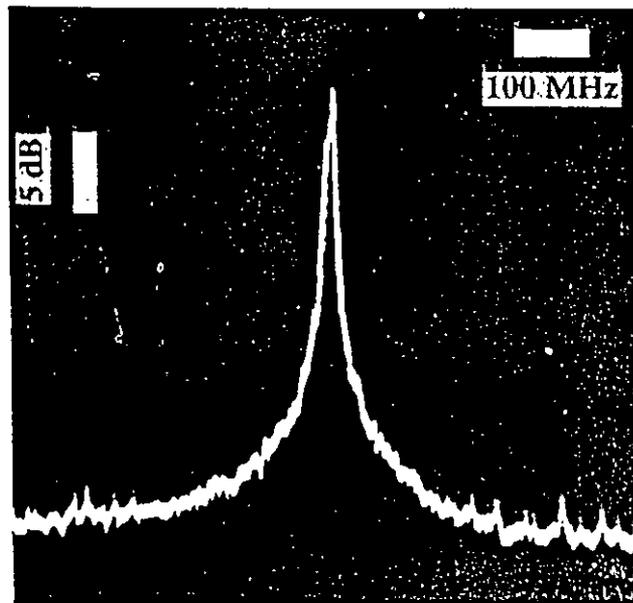


El ancho total del espectro de emisión (incluyendo todos los modos de emisión) es conocido como el ancho espectral del láser. En un láser Fabry-Perot este parámetro depende de la corriente de inyección

El ancho individual de un modo es conocido como el ancho de línea.

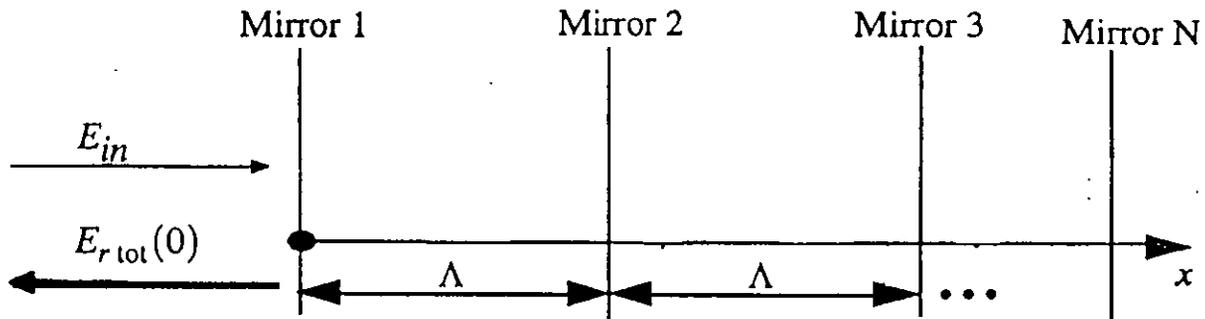


Para un láser que emite un solo modo, el ancho de línea es igual ancho espectral del láser. Este es el caso ideal y para lograrlo se utilizan estructuras con reflectores de Bragg, los dispositivos resultantes son llamados láseres de retroalimentación distribuida o **DFB** (distributed feedback) y láseres de reflexión de Bragg distribuida o **DBR** (distributed Bragg reflection).



## Reflexiones de Bragg

Primero consideremos una serie de espejos que transmiten y reflejan parcialmente la luz incidente. Así la onda óptica plana de entrada  $E_{in}$  viaja a través de varios espejos de débil reflexión,  $M_1, M_2, \dots, M_N$ . Cada espejo transmite la mayoría de la potencia incidente y refleja una muy pequeña fracción. De esta manera el coeficiente de transmisión es  $t \approx 1$  y el coeficiente de reflexión es  $r \ll 1$ .



En cada espejo las ondas reflejadas  $E_{rv}$  y las ondas transmitidas  $E_{tv}$  son:

$$E_{r1}(0) = E_{in}(0) \cdot r; \quad E_{t1}(0) = E_{in}(0) \cdot t$$

$$E_{r2}(\Lambda) = E_{t1}(0) \cdot r \cdot e^{-j\beta\Lambda}; \quad E_{t2}(\Lambda) = E_{t1}(0) \cdot t \cdot e^{-j\beta\Lambda}$$

$$E_{r3}(2\Lambda) = E_{t2}(\Lambda) \cdot r \cdot e^{-j\beta\Lambda}; \quad E_{t3}(2\Lambda) = E_{t2}(\Lambda) \cdot t \cdot e^{-j\beta\Lambda}$$

$$\vdots$$

$$E_{rN}[(N-1)\Lambda] = E_{t(N-1)}[(N-2)\Lambda] \cdot r \cdot e^{-j\beta\Lambda};$$

$$E_{tN}[(N-1)\Lambda] = E_{t(N-1)}[(N-2)\Lambda] \cdot t \cdot e^{-j\beta\Lambda}$$

donde  $\Lambda$  es el periodo de la estructura (o el espaciamento entre dos espejos adyacentes),  $\beta$  es la constante de propagación y  $E_{rK}[(k-1)\Lambda]$  y  $E_{tK}[(k-1)\Lambda]$  son respectivamente la onda reflejada y transmitida en el  $k$ ésimo espejo localizado en  $(k-1)\Lambda$ .



**CICESE** Para encontrar la onda reflejada total en  $x=0^-$ , es necesario agregar las reflexiones de todos los espejos y tomar en cuenta el defasamiento debido a la propagación de la luz entre dos espejos:

$$E_{rtot}(0) = E_{r1}(0) + E_{r2}(\Lambda) \cdot e^{-j\beta\Lambda} \cdot t + E_{r3}(2\Lambda) \cdot e^{-2j\beta\Lambda} \cdot t^2 + \dots \\ + E_{rN}[(N-1)\Lambda] \cdot e^{(N-1)j\beta\Lambda} \cdot t^{N-1}$$

(en esta ecuación se ha despreciado las reflexiones múltiples entre los espejos)

ahora por substituir las expresiones para  $E_{r1}(0)$ ,  $E_{t1}(0)$ ,  $E_{rK}[(k-1)\Lambda]$  y  $E_{tK}[(k-1)\Lambda]$  en esta última expresión se obtiene que:

$$E_{rtot}(0) = rE_{in}(0) [1 + t^2 e^{-2j\beta\Lambda} + t^4 e^{-4j\beta\Lambda} + t^{2(N-1)} e^{-2(N-1)j\beta\Lambda}]$$

Dado que la expresión entre los corchetes es una serie geométrica,  $E_{rtot}(0)$  puede ser escrita como:

$$E_{rtot}(0) = rE_{in}(0) \cdot \frac{1 - M^N}{1 - M}$$

donde

$$M \equiv t^2 \cdot e^{-2j\beta\Lambda}$$

Para que  $E_{rtot}(0)$  sea máxima es necesario encontrar el máximo de la función:

$$\frac{1 - M^N}{1 - M}$$

el cual se obtiene (por los métodos clásicos de derivación) cuando  $M=1$ , es decir cuando  $M$  es puramente real. Entonces, después de utilizar la regla de Hôpital, se obtiene que  $E_{rtot}(0)$  máxima es igual a:

$$E_{rtot}(0) = rE_{rin}(0)N$$

El sentido físico de esta expresión es que es posible una fuerte reflexión total, aún cuando la reflexión de cada espejo sea débil.

Ahora para que  $M$  sea puramente real es necesario que:

$$-2\beta\Lambda = n2\pi$$

(aquí se ha considerado que el coeficiente de transmisión  $t$  es puramente real)

escribiendo explícitamente el valor de la constante de propagación ( $\beta = 2\pi/\lambda$ ) en esta ecuación se obtiene que:

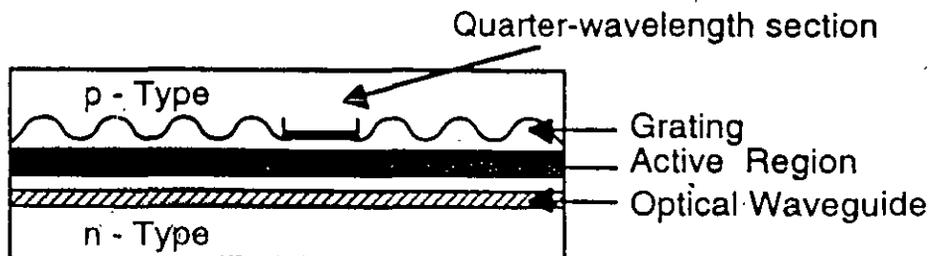
$$\frac{-2\Lambda(2\pi)}{\lambda} = n2\pi$$

y de aquí que  $\Lambda = m\lambda/2$  (donde  $m = -n$ ) lo cual se conoce como condición de Bragg.

El significado físico de esta condición es que una rejilla de difracción longitudinal (reflector de Bragg) actúa como un espejo de alta reflectividad, si su periodo es igual a un múltiplo entero de la mitad de la longitud de onda de la luz que se propaga.

## Láser DFB

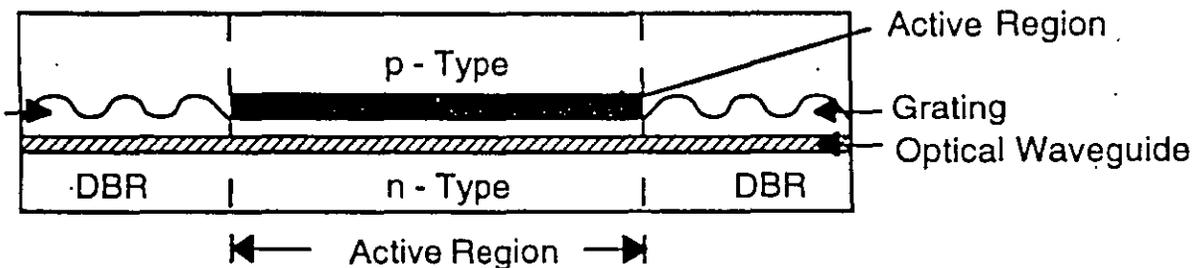
Estos láseres al igual que los DBR son diseñados para oscilar en solo un modo longitudinal y transversal, es decir producen luz monocromática.



En los láseres DFB una rejilla de difracción longitudinal es grabada a lo largo de la región activa, salvo en una pequeña zona en el centro cuyo largo es igual a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia de emisión. Estos láseres se pueden ver como un corto resonador de  $\lambda/4$  acotado por dos reflectores distribuidos.

## Láser DBR

En este caso los reflectores de Bragg se encuentran en los extremos de la región activa, es decir que las reflexiones se producen en un medio que no amplifica, pero que sin embargo confina la luz (pues junto con la región activa forma la guía de onda óptica del dispositivo).



En algunos láseres DBR un reflector de Bragg es cambiado por una faceta clivada es decir por un espejo.

## Diferencias entre un láser DFB y un láser DBR

Dado que las estructuras de estos láseres son diferentes, sus propiedades ópticas y eléctricas lo son también.

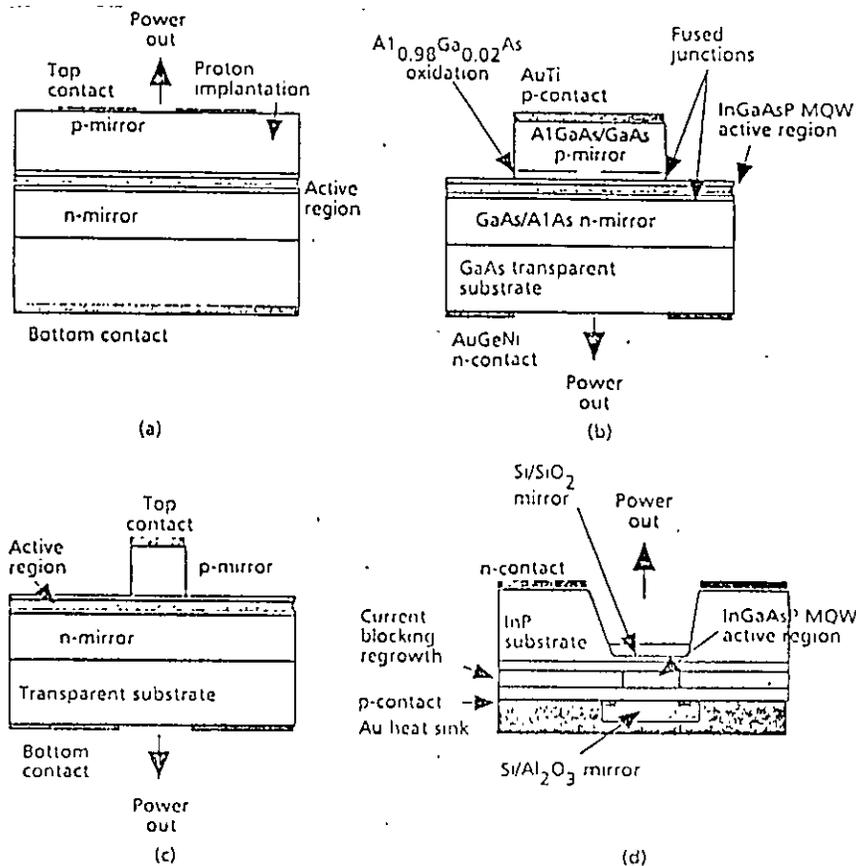
Los láseres DFB tienen un gran ancho de banda de modulación, un bajo ruido de intensidad y de frecuencia, una excelente supresión de modo lateral y un ancho de línea pequeño. Sin embargo como en estos láseres, el reflector de Bragg se encuentra cubriendo a la región activa, ellos observan grandes corrimientos en la frecuencia óptica de emisión (chirp). Es decir que cuando la corriente de inyección cambia la potencia y la frecuencia óptica cambian simultáneamente.

Los láseres DBR tienen la ventaja de contar con el reflector de Bragg separado de la región activa. Así se puede cambiar la ganancia y la frecuencia de emisión de manera independiente. (La primera cambiando la corriente de la región activa y la segunda cambiando la corriente que afecta al reflector, para esto es necesario un segundo electrodo).

## Láser de Cavity Vertical

El aspecto fundamental que define a estos láseres es que ellos emiten perpendicularmente a la superficie del semiconductor. De esta manera el resonador es extremadamente pequeño y por lo tanto la región de ganancia lo es también.

Para lograr tener una ganancia que iguale a las pérdidas de la cavidad es necesario que estas sean muy pequeñas. Esto requiere que los espejos sean de alta reflectividad.

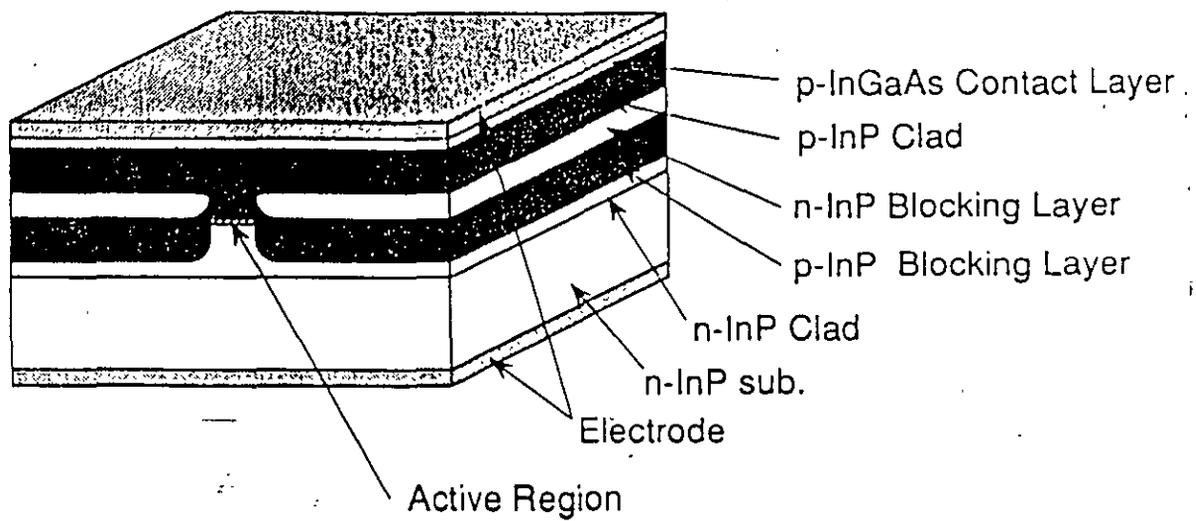


### Láser de cavity vertical

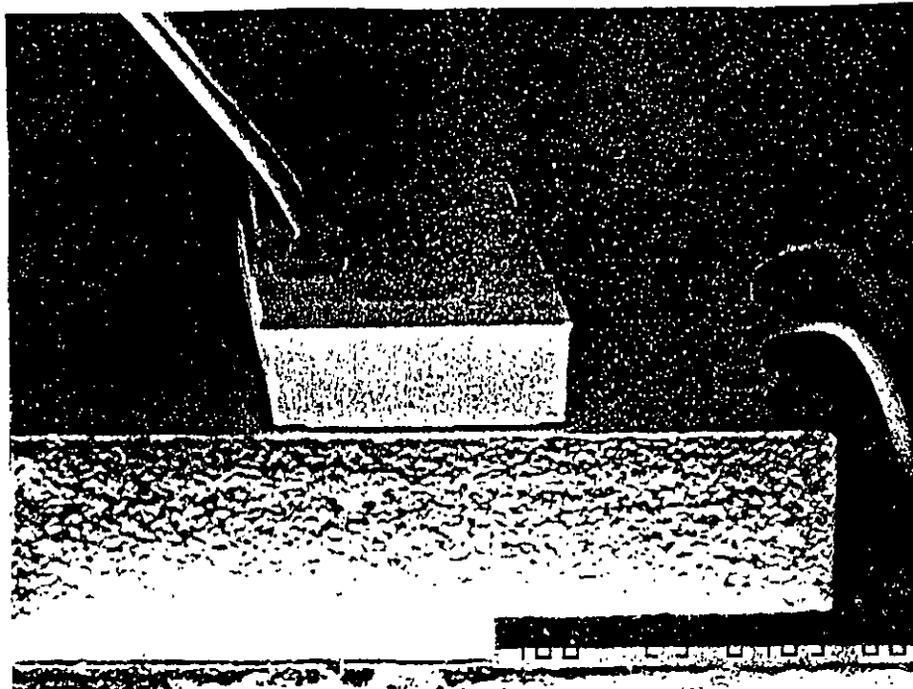
Las ventajas de estos láseres es que son completamente monomodos dado la pequeña región activa, la corriente de umbral es muy pequeña ( $40 \mu\text{A}$ ), poseen anchos de banda de modulación muy grandes ( $>10 \text{ GHz}$ ) debido a la gran densidad de fotones dentro de la cavidad. Sin embargo, tienen como desventaja una pobre disipación de calor, por lo que es difícil operarlos en altas temperaturas y las potencias de salida son inferiores a las de los otros láseres de semiconductor.

## Presentación de los láseres

Sección transversal de un láser DFB de heteroestructura enterrada

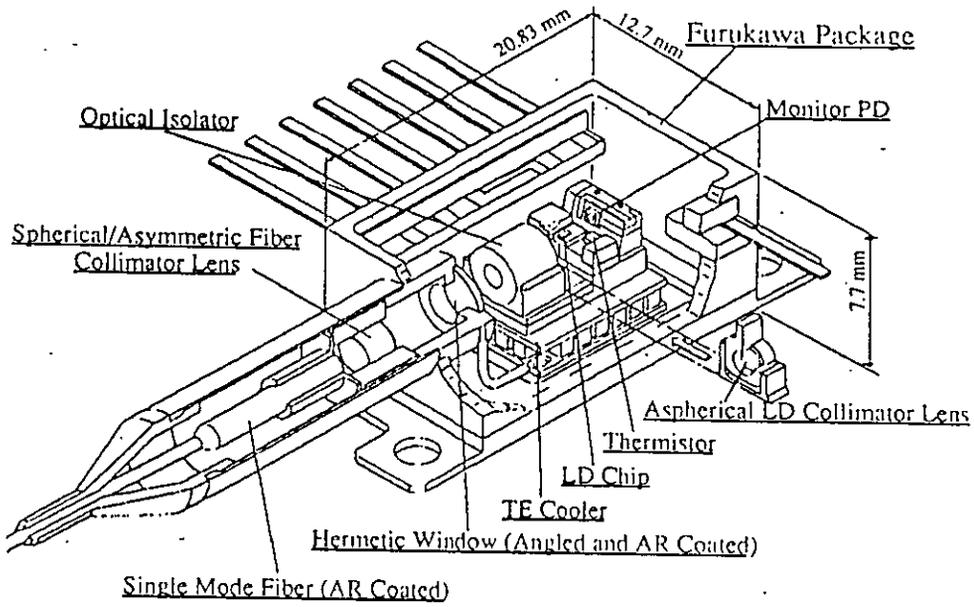


"Chip" del láser montado en un disipador de calor

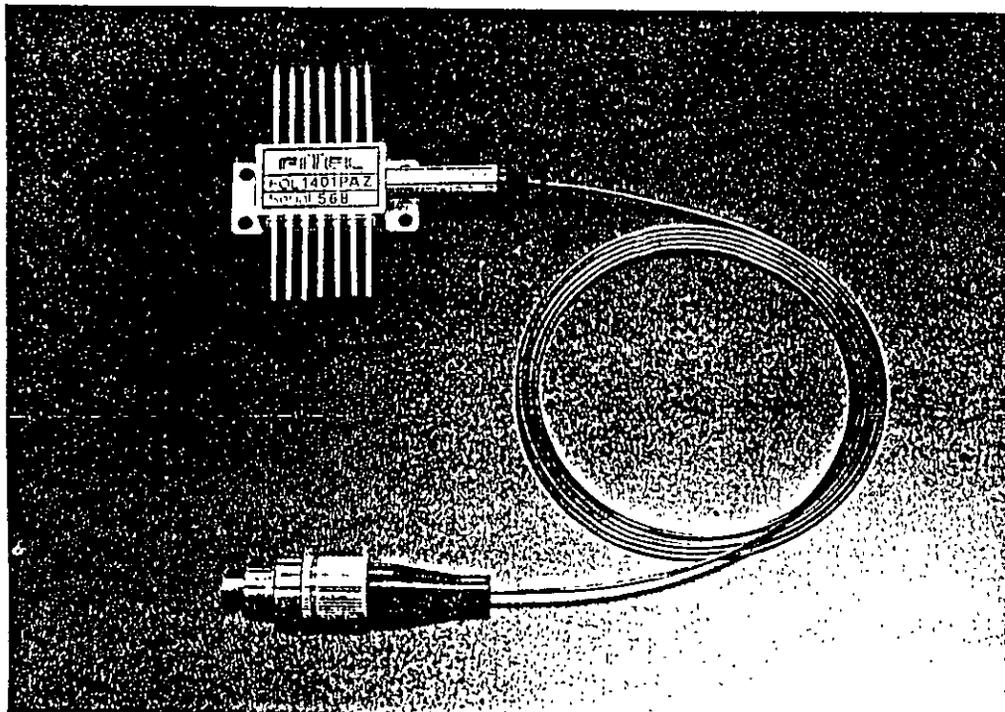




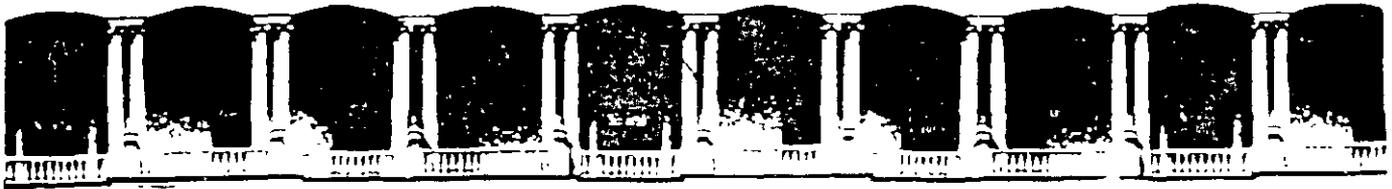
# CICESE Empaquetado de un láser en un sistema transmisor por fibra óptica



Internal view of a laser package. (Courtesy of Furukawa, Inc.)



External view of a laser package. (Photo courtesy of Furukawa, Inc.)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

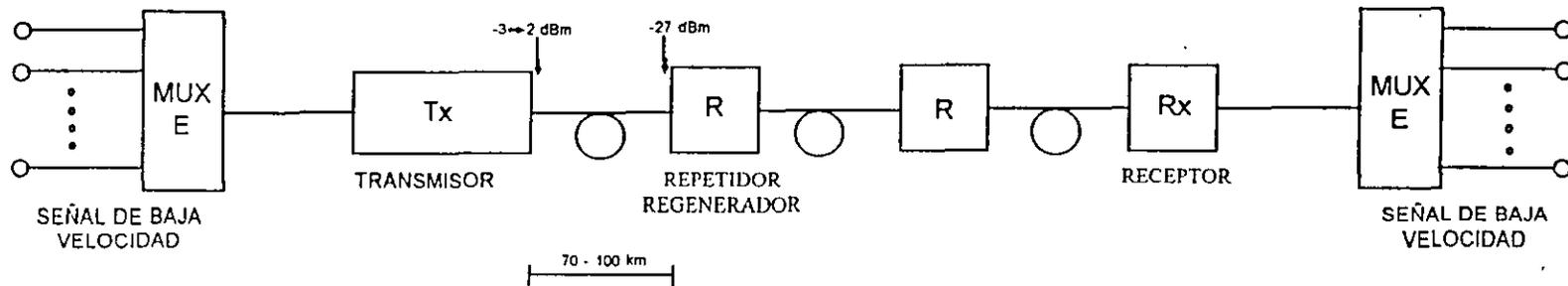
**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**AMPLIFICADORES ÓPTICOS**

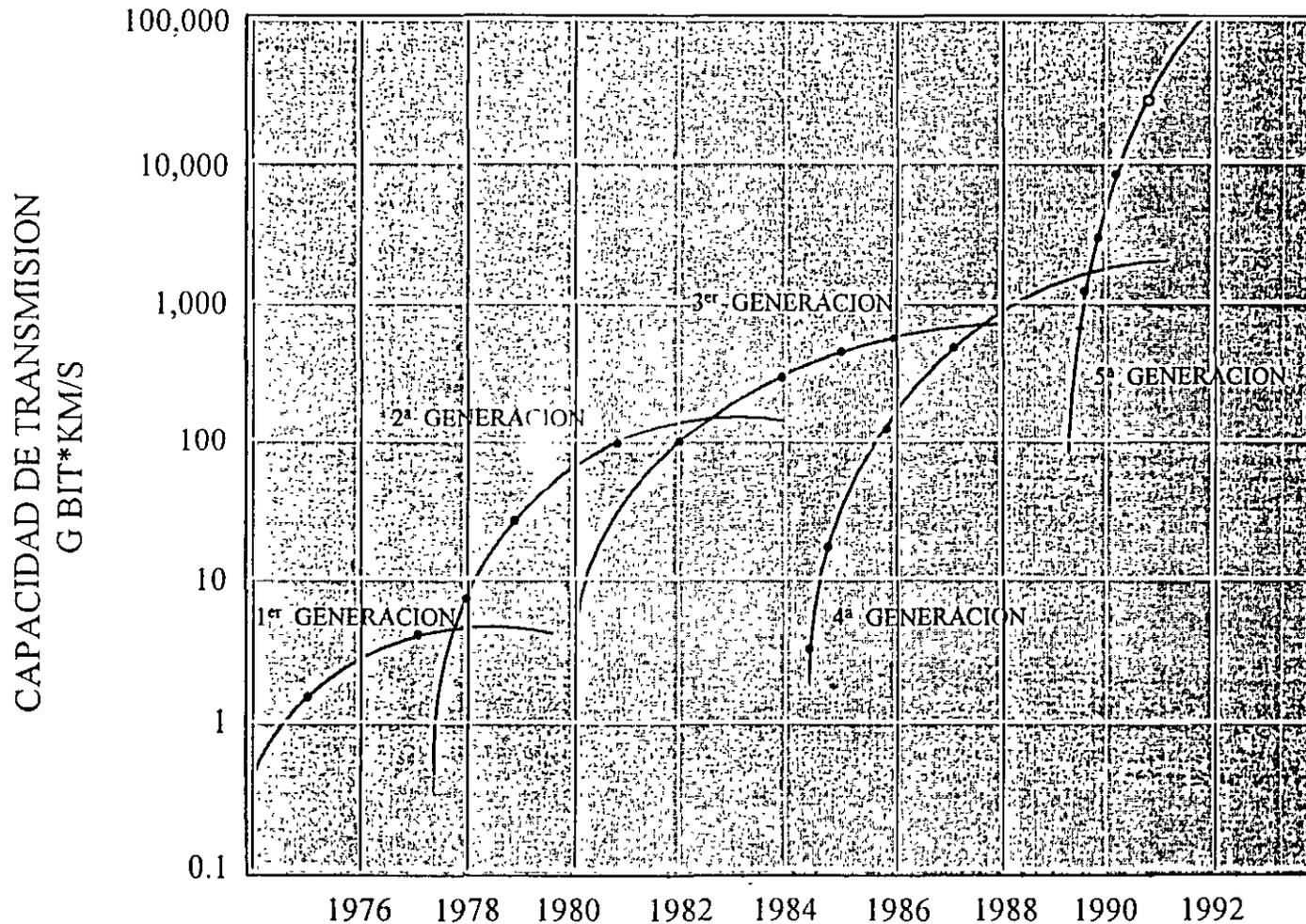
**CONFERENCISTA  
ING. FERNANDO MARTÍNEZ PIÑÓN  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

# SISTEMA TRADICIONAL DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA ( $\lambda = 1550$ nm)



- Operación en una sola longitud de onda.
- Utiliza repetidores regeneradores optoelectrónicos.
- Ruido y distorsión no acumulativos.
- Incremento en la velocidad de transmisión implica cambio de Tx, Rx y R's.

# EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION POR FIBRAS OPTICAS



LA CAPACIDAD DE TRANSMISION DE LAS FIBRAS SE HA INCREMENTADO 10 VECES CADA CUATRO AÑOS DESDE 1975.

LIGHTWAVE COMMUNICATIONS: THE FIFTH GENERATION. EMMANUEL DESURVIR E. SCIENTIFIC AMERICAN

## GENERACIONES DE LOS SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA

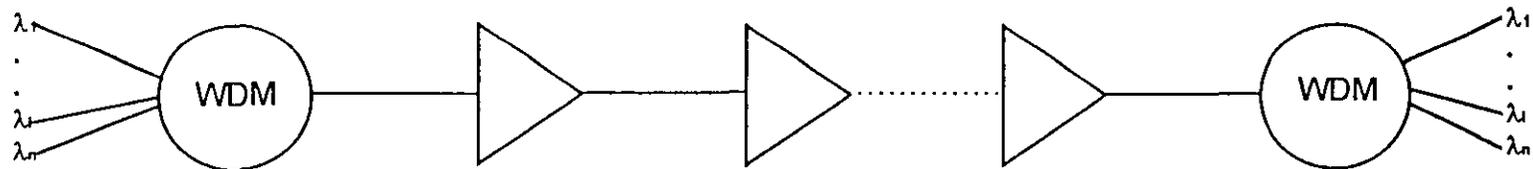
GENERACIÓN	Fecha de aplicación comercial	Longitud de onda de operación (nm).	Tipo de Fibra	Distancia máxima entre terminales o repetidores (Km)	Máxima velocidad de transmisión disponible comercialmente (Mb/s)
1ra	1978	850	Multimodo	10	34
2da	1982	1300	Unimodo	40	140
3ra	1985	1550	Unimodo	80	565
4ta	-	Sistemas coherentes. Demostraciones de laboratorio.			
5ta	1992	1550	Unimodo	250*	2500

\* Sistemas submarinos costeros sin repetidores.

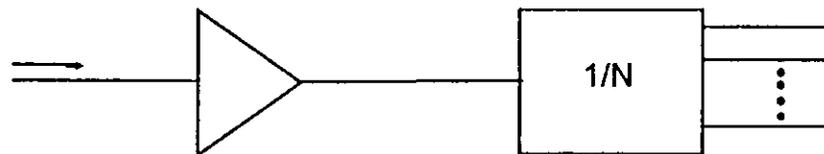
- La quinta generación se distingue por la introducción de amplificación óptica.

## ¿PORQUE AMPLIFICADORES OPTICOS?

- Mayor separación entre equipos terminales ADM.
  - Sistemas terrestres.
  - Festones costeros.
- Capacidad de elevar la velocidad de transmisión cambiando solo las terminales.
- Altas velocidades potenciales de transmisión a través de WDM.



- Compensación práctica de pérdidas en dispositivos pasivos.



- Bajo costo esperado y alta confiabilidad.
- Potencial para crear un "Ducto de Luz" (Lightpipe) universal entre terminales.

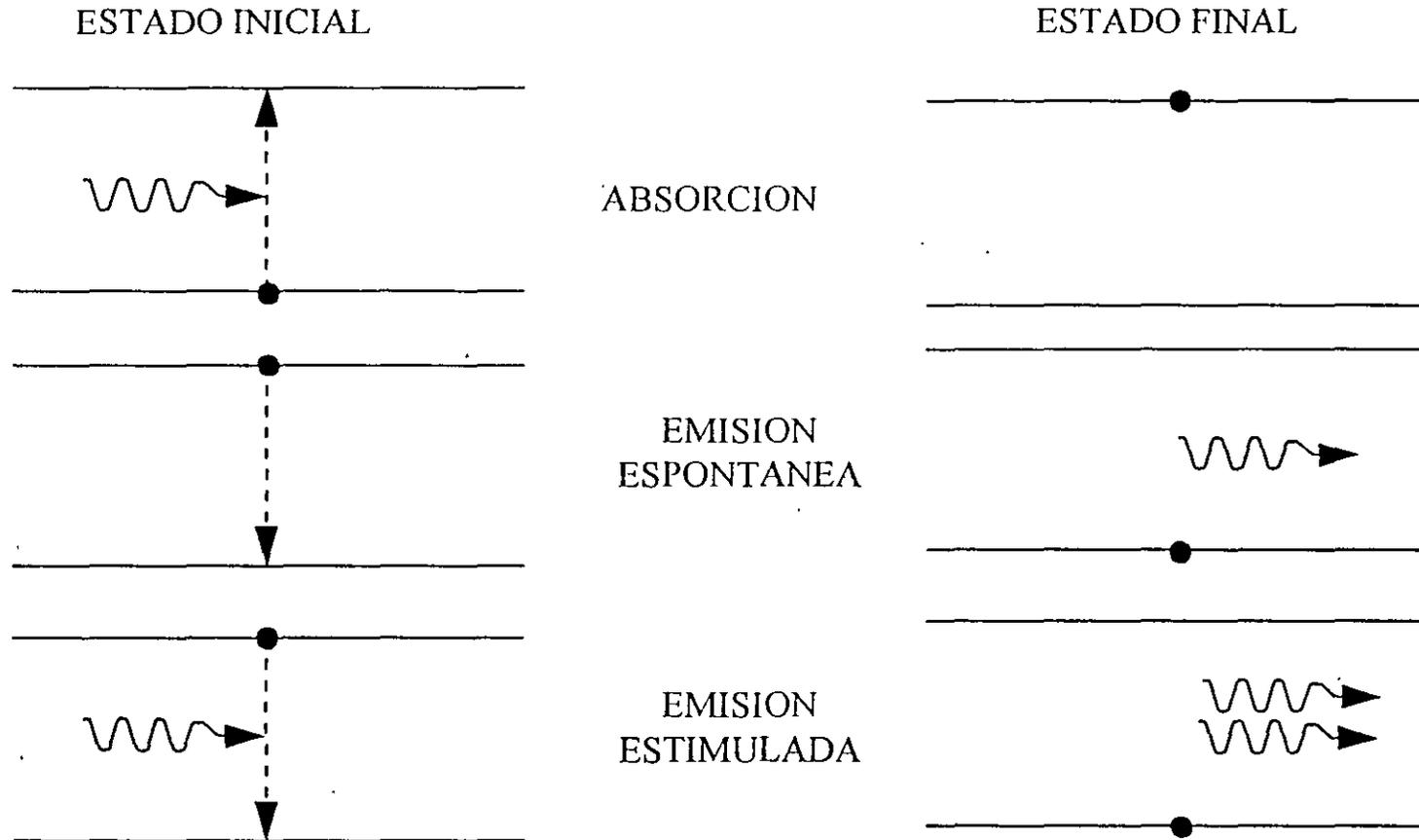
# AMPLIFICADORES OPTICOS : PARTE I

¿ QUE ES UN AMPLIFICADOR OPTICO ?

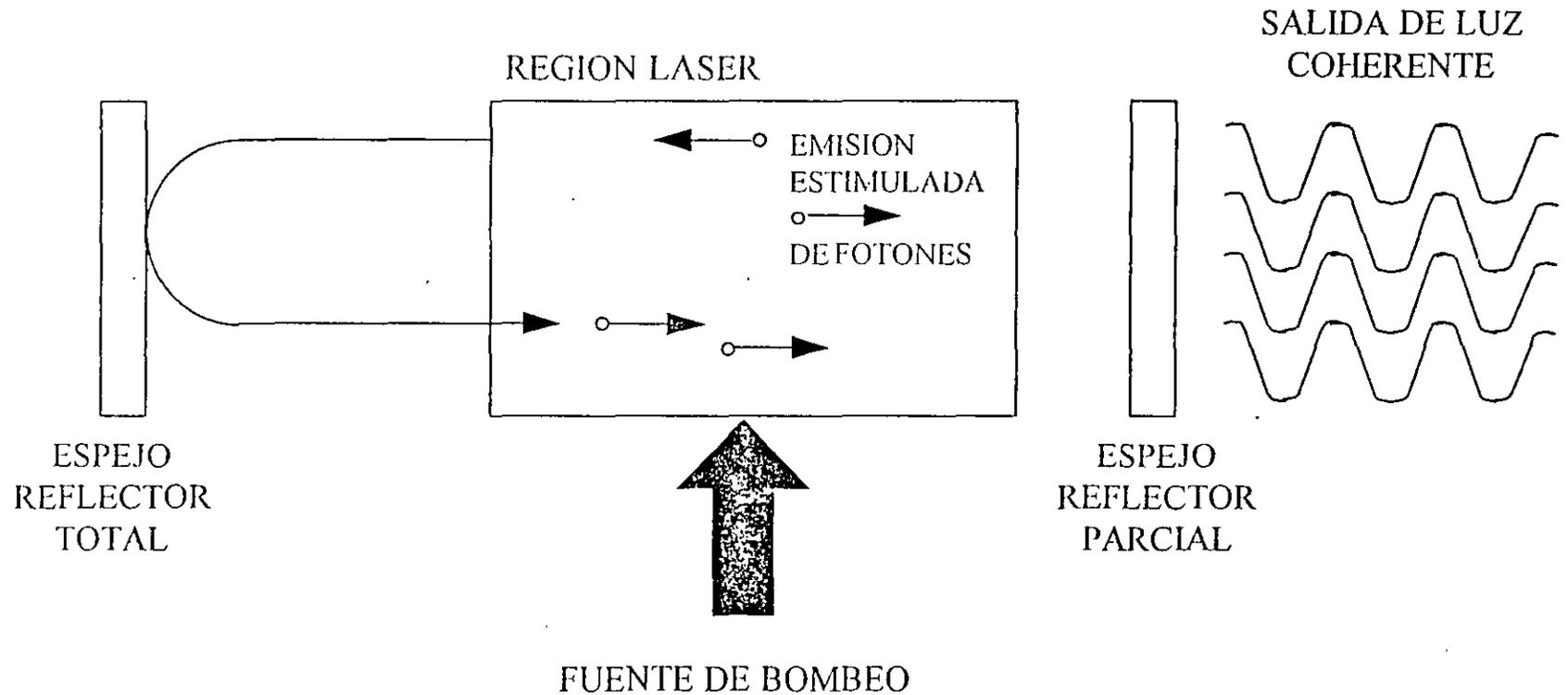
ORIGEN : EL EFECTO LASER

LASER : LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION.

PROCESO DE ABSORCION Y EMISION:

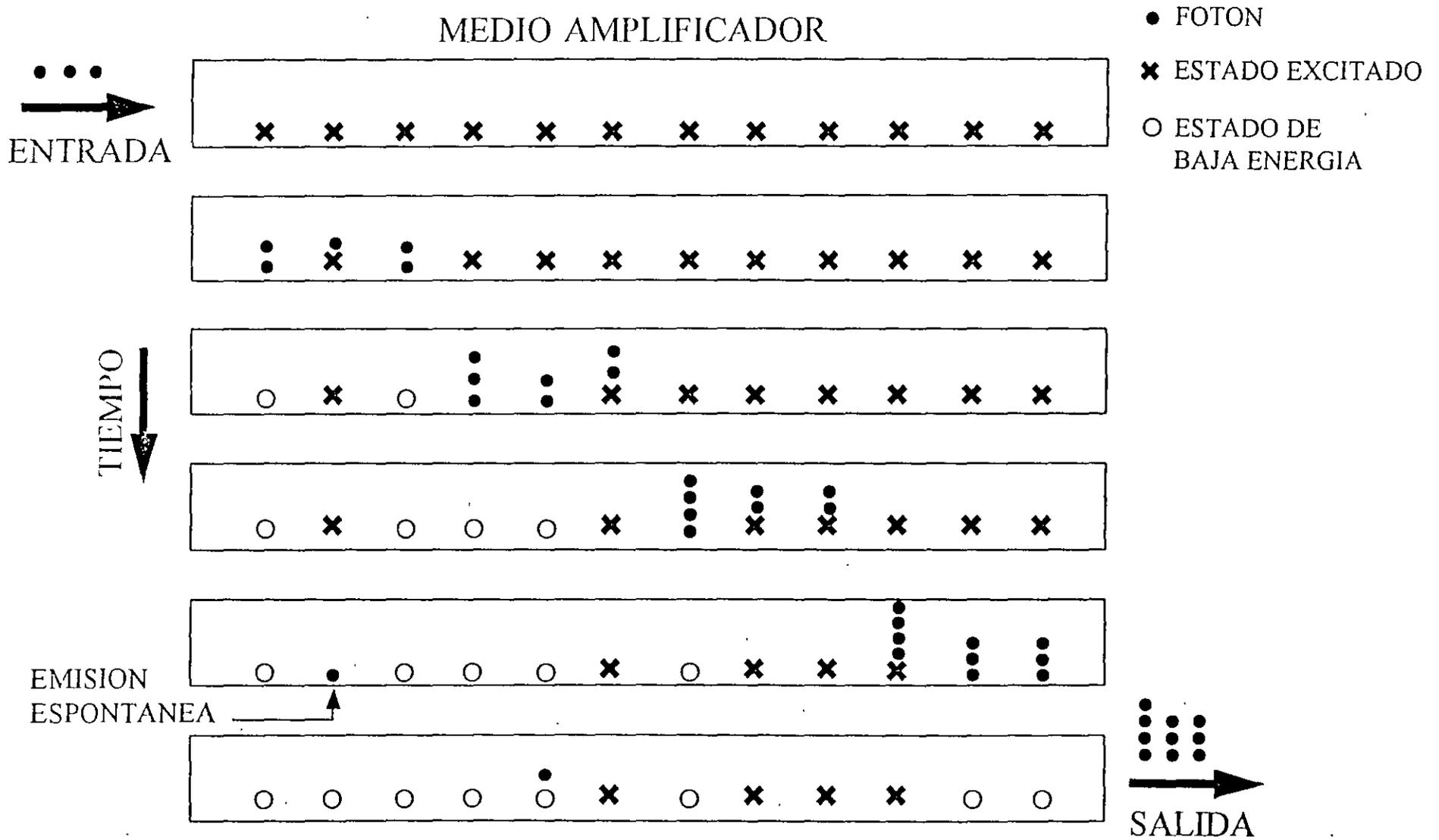


# CAVIDAD OPTICA RESONANTE



- EN REALIDAD UN LASER ES UN OSCILADOR OPTICO
- UN AMPLIFICADOR OPTICO ES UN DISPOSITIVO AMPLIFICADOR BASADO EN EL EFECTO LASER PRESCINDIENDO DE LA CAVIDAD OPTICA RESONANTE

# AMPLIFICACION DE LUZ A TRAVES DE EMISION ESTIMULADA



# ANTECEDENTES HISTÓRICOS

- 1958** Arthur Schawlow y Charles Townes de Bell Laboratories proponen el LASER.
- 1960** Demostración del láser de rubí por Theodor Maiman.
- 1964** Demostración del efecto láser en varillas de vidrio dopadas con elementos de tierras raras y amplificación óptica en fibras dopadas de Neodimio ( 1060 nm). Elias Snitzer. (Fuente de Bombeo: Lámparas de destello).
- 1974** Demostración de amplificación en fibras dopadas en Neodimio (1060nm) y bombeadas con láseres de semiconductor. Julian Stone y Charles Burrus de Bell Laboratories.
- 1985-86** Demostración del amplificador de fibra óptica dopada con Erblio (EDFA) a 1550 nm por David Payne en la Universidad de Southampton, Inglaterra. (Longitud de onda de bombeo: 650 nm).
- 1988-89** Demostración de dispositivos EDFA prácticos bombeados con láseres de semiconductor a las longitudes de onda de 980 nm y 1480 nm en los laboratorios de la Universidad de Southampton, ATT y NTT.

# TABLA PERIODICA

## ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN A LA FIBRA OPTICA.

PERIOD ↓	GROUP																	
	1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8			1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	0
1	<sup>1</sup> 1 H 1																	<sup>0</sup> 2 He 2
	LIGHT METALS						HEAVY METALS						NON METALS			INERT GAS		
2	<sup>1</sup> 3 Li 3	<sup>2</sup> 4 Be 4											<sup>3</sup> 5 B 5	<sup>2</sup> 6 C 6	<sup>1</sup> 7 N 7	<sup>1</sup> 8 O 8	<sup>-1</sup> 9 F 9	<sup>0</sup> 10 Ne 10
	BRITTLE			DUCTILE			LOW-MELTING											
3	<sup>1</sup> 11 Na 11	<sup>2</sup> 12 Mg 12											<sup>3</sup> 13 Al 13	<sup>4</sup> 14 Si 14	<sup>3</sup> 15 P 15	<sup>4</sup> 16 S 16	<sup>3</sup> 17 Cl 17	<sup>0</sup> 18 Ar 18
4	<sup>1</sup> 19 K 19	<sup>2</sup> 20 Ca 20	<sup>3</sup> 21 Sc 21	<sup>4</sup> 22 Ti 22	<sup>5</sup> 23 V 23	<sup>6</sup> 24 Cr 24	<sup>7</sup> 25 Mn 25	<sup>8</sup> 26 Fe 26	<sup>9</sup> 27 Co 27	<sup>10</sup> 28 Ni 28	<sup>11</sup> 29 Cu 29	<sup>12</sup> 30 Zn 30	<sup>13</sup> 31 Ga 31	<sup>14</sup> 32 Ge 32	<sup>15</sup> 33 As 33	<sup>16</sup> 34 Se 34	<sup>17</sup> 35 Br 35	<sup>0</sup> 36 Kr 36
5	<sup>1</sup> 37 Rb 37	<sup>2</sup> 38 Sr 38	<sup>3</sup> 39 Y 39	<sup>4</sup> 40 Zr 40	<sup>5</sup> 41 Nb 41	<sup>6</sup> 42 Mo 42	<sup>7</sup> 43 Tc 43	<sup>8</sup> 44 Ru 44	<sup>9</sup> 45 Rh 45	<sup>10</sup> 46 Pd 46	<sup>11</sup> 47 Ag 47	<sup>12</sup> 48 Cd 48	<sup>13</sup> 49 In 49	<sup>14</sup> 50 Sn 50	<sup>15</sup> 51 Sb 51	<sup>16</sup> 52 Te 52	<sup>17</sup> 53 I 53	<sup>0</sup> 54 Xe 54
6	<sup>1</sup> 55 Cs 55	<sup>2</sup> 56 Ba 56	◆ 57-71	<sup>4</sup> 72 Hf 72	<sup>5</sup> 73 Ta 73	<sup>6</sup> 74 W 74	<sup>7</sup> 75 Re 75	<sup>8</sup> 76 Os 76	<sup>9</sup> 77 Ir 77	<sup>10</sup> 78 Pt 78	<sup>11</sup> 79 Au 79	<sup>12</sup> 80 Hg 80	<sup>13</sup> 81 Tl 81	<sup>14</sup> 82 Pb 82	<sup>15</sup> 83 Bi 83	<sup>16</sup> 84 Po 84	<sup>17</sup> 85 At 85	<sup>0</sup> 86 Rn 86
7	<sup>1</sup> 87 Fr 87	<sup>2</sup> 88 Ra 88	★ 89-103	— 104	— 105													

TRANSITION ELEMENTS { BETWEEN GROUPS 2A AND 3A

◆ LANTHANIDES (RARE EARTHS)	<sup>3</sup> 57 La	<sup>3</sup> 58 Ce	<sup>3</sup> 59 Pr	<sup>3</sup> 60 Nd	<sup>3</sup> 61 Pm	<sup>2</sup> 62 Sm	<sup>2</sup> 63 Eu	<sup>3</sup> 64 Gd	<sup>3</sup> 65 Tb	<sup>3</sup> 66 Dy	<sup>3</sup> 67 Ho	<sup>3</sup> 68 Er	<sup>3</sup> 69 Tm	<sup>2</sup> 70 Yb	<sup>3</sup> 71 Lu
★ ACTINIDES	<sup>3</sup> 89 Ac	<sup>4</sup> 90 Th	<sup>4</sup> 91 Pa	<sup>3</sup> 92 U	<sup>3</sup> 93 Np	<sup>4</sup> 94 Pu	<sup>3</sup> 95 Am	<sup>3</sup> 96 Cm	<sup>3</sup> 97 Bk	<sup>3</sup> 98 Cf	<sup>3</sup> 99 Es	<sup>3</sup> 100 Fm	<sup>3</sup> 101 Md	<sup>3</sup> 102 No	<sup>3</sup> 103 Lw

# AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA)

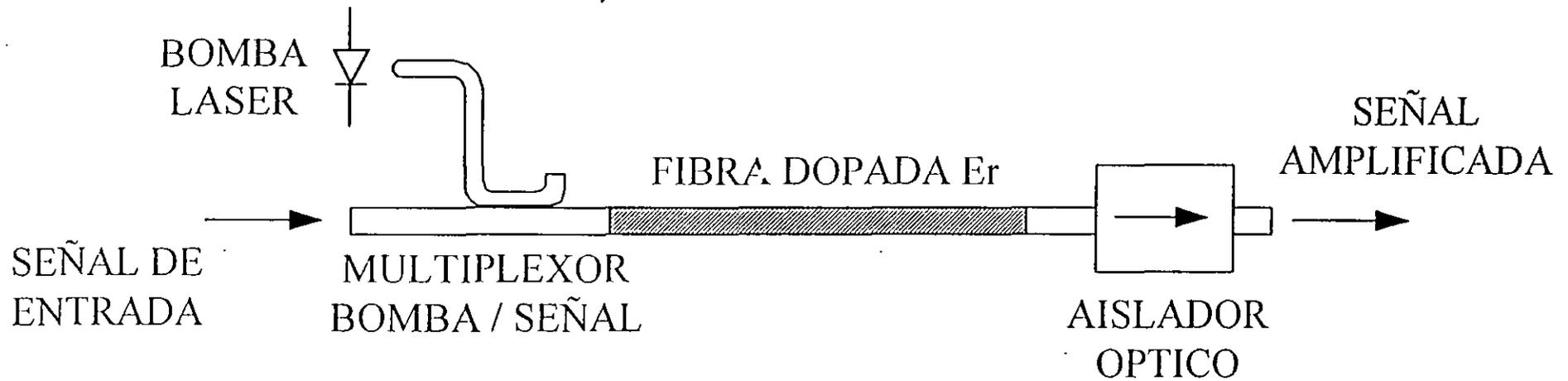
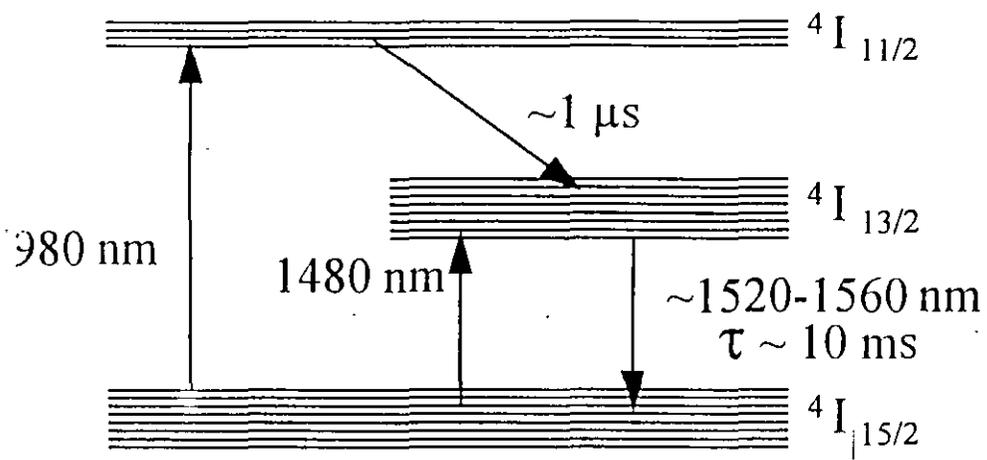
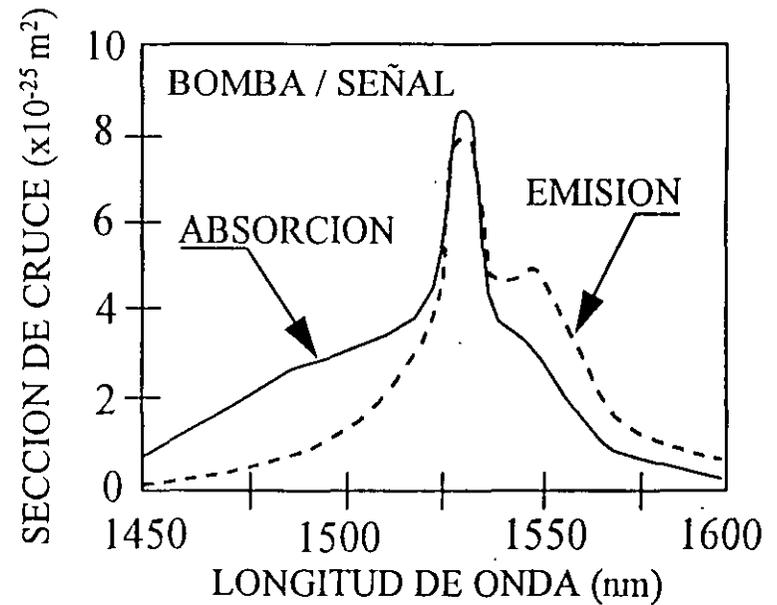


DIAGRAMA DE NIVEL DE ENERGIA

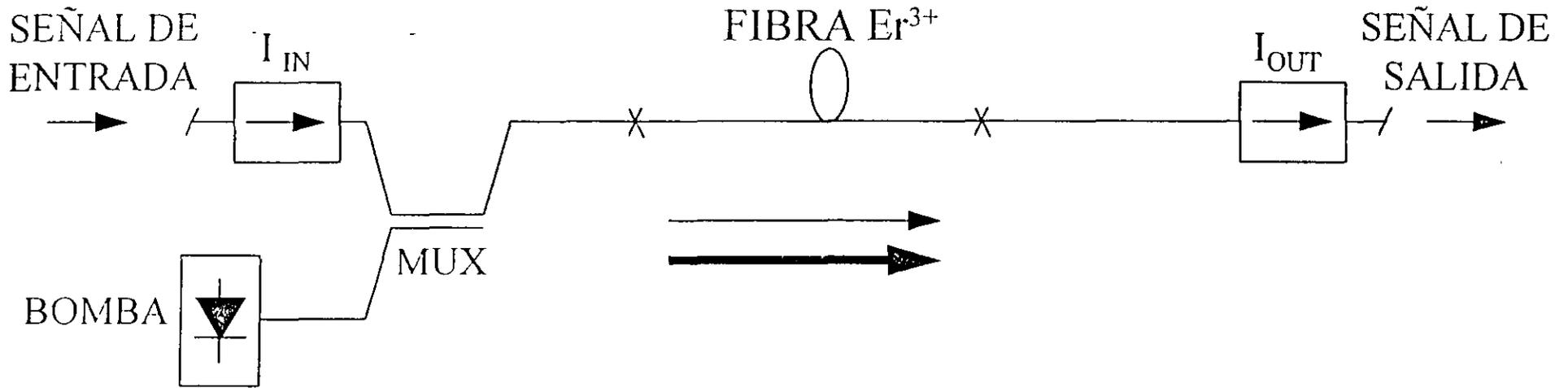


ESPECTRO DE EMISION Y ABSORCION

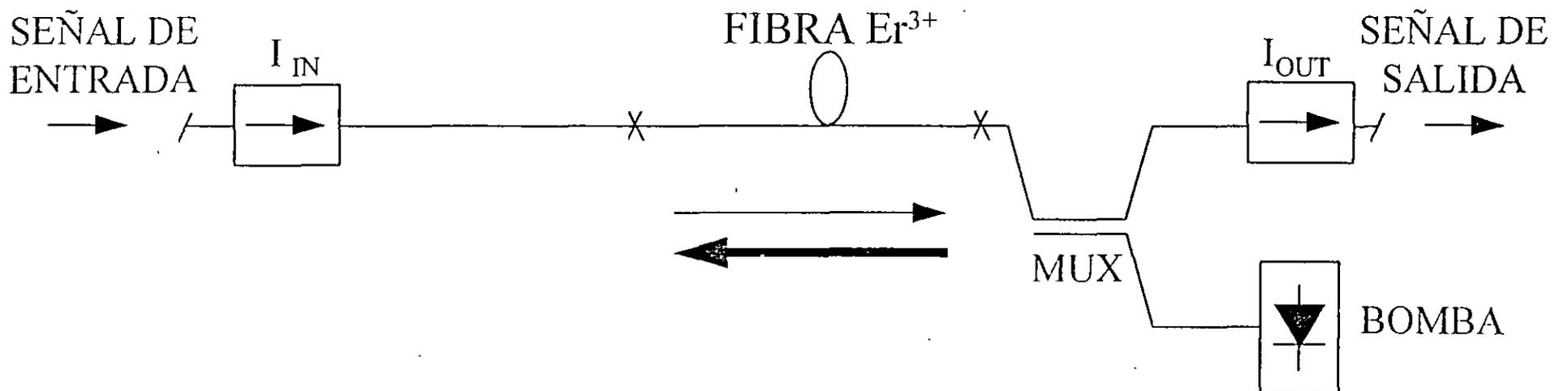


# DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN EDFA

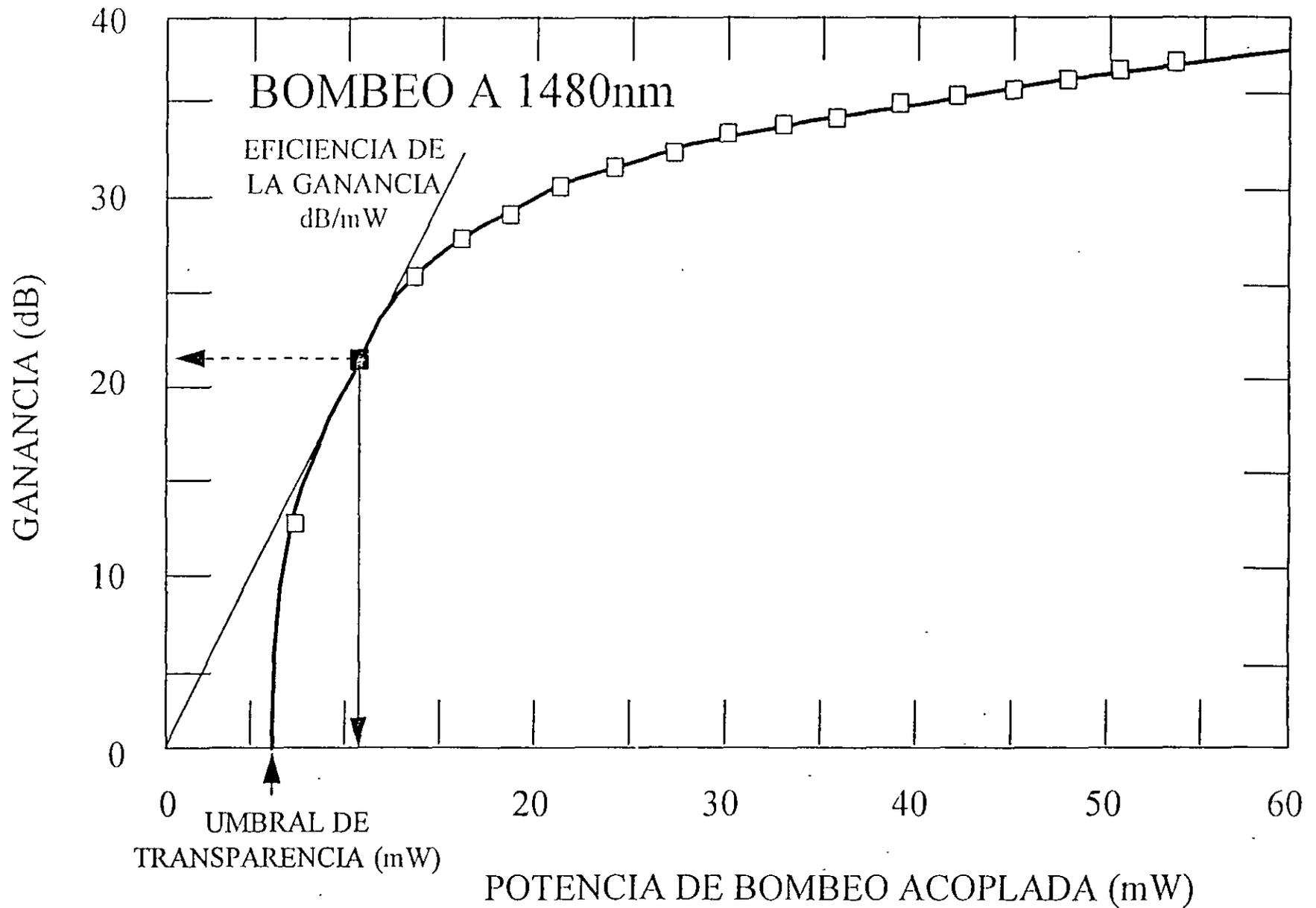
## CODIRECCIONAL



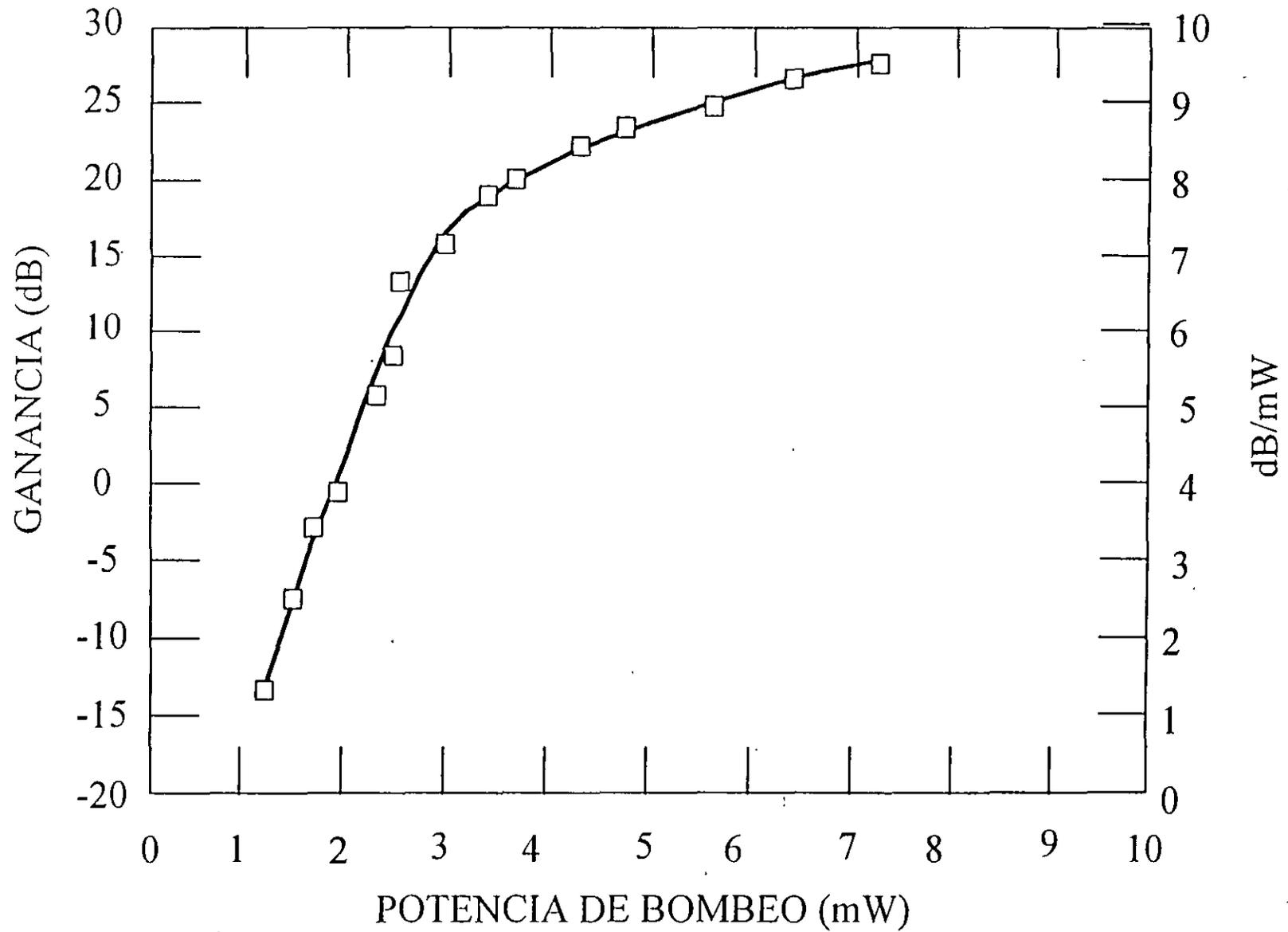
## CONTRADIRECCIONAL



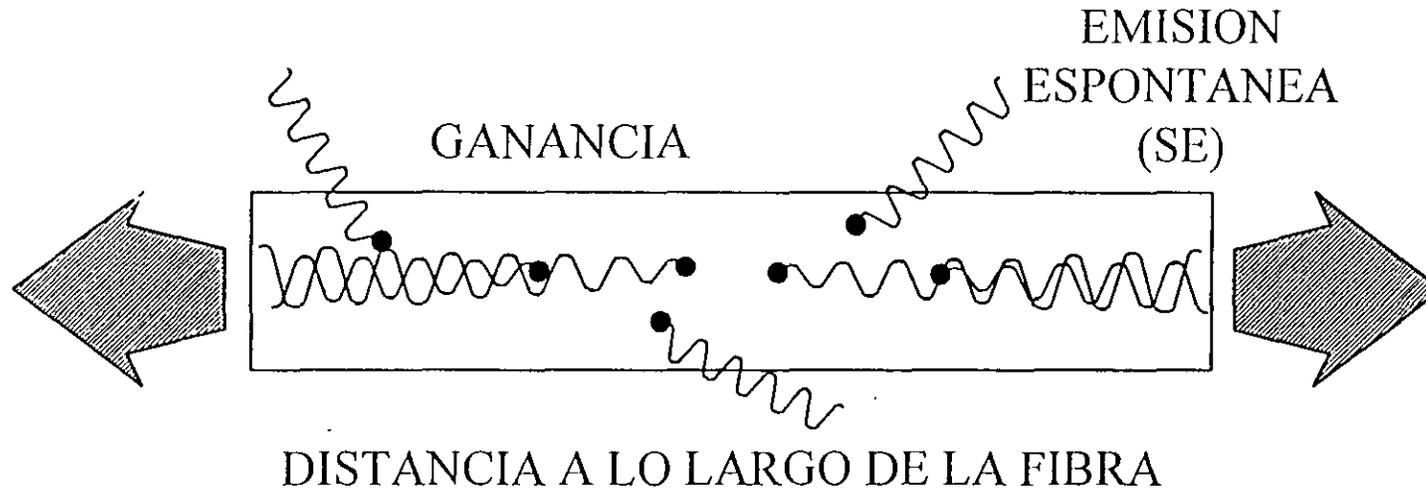
# CURVA DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR



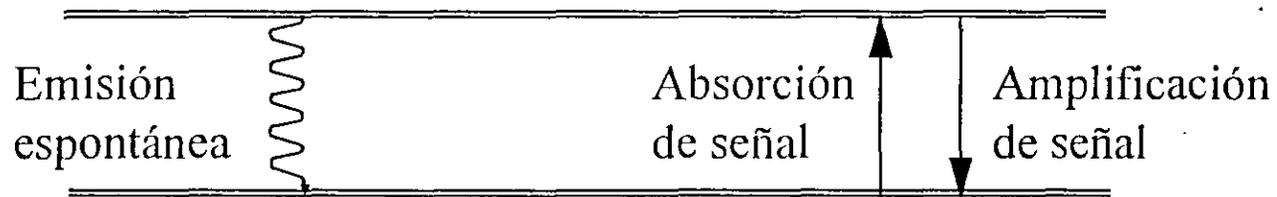
# AMPLIFICADOR DE FIBRA BOMBEADO A 980 nm



# RUIDO DEL AMPLIFICADOR OPTICO



- ASE : Emisión espontánea amplificada



## FIGURA DE RUIDO DEL AMPLIFICADOR OPTICO

$$NF = \frac{SNR_1}{SNR_0} = \left( \frac{S_1}{N_1} \right) \left( \frac{N_0}{S_0} \right) = \frac{N_0}{GN_1}$$

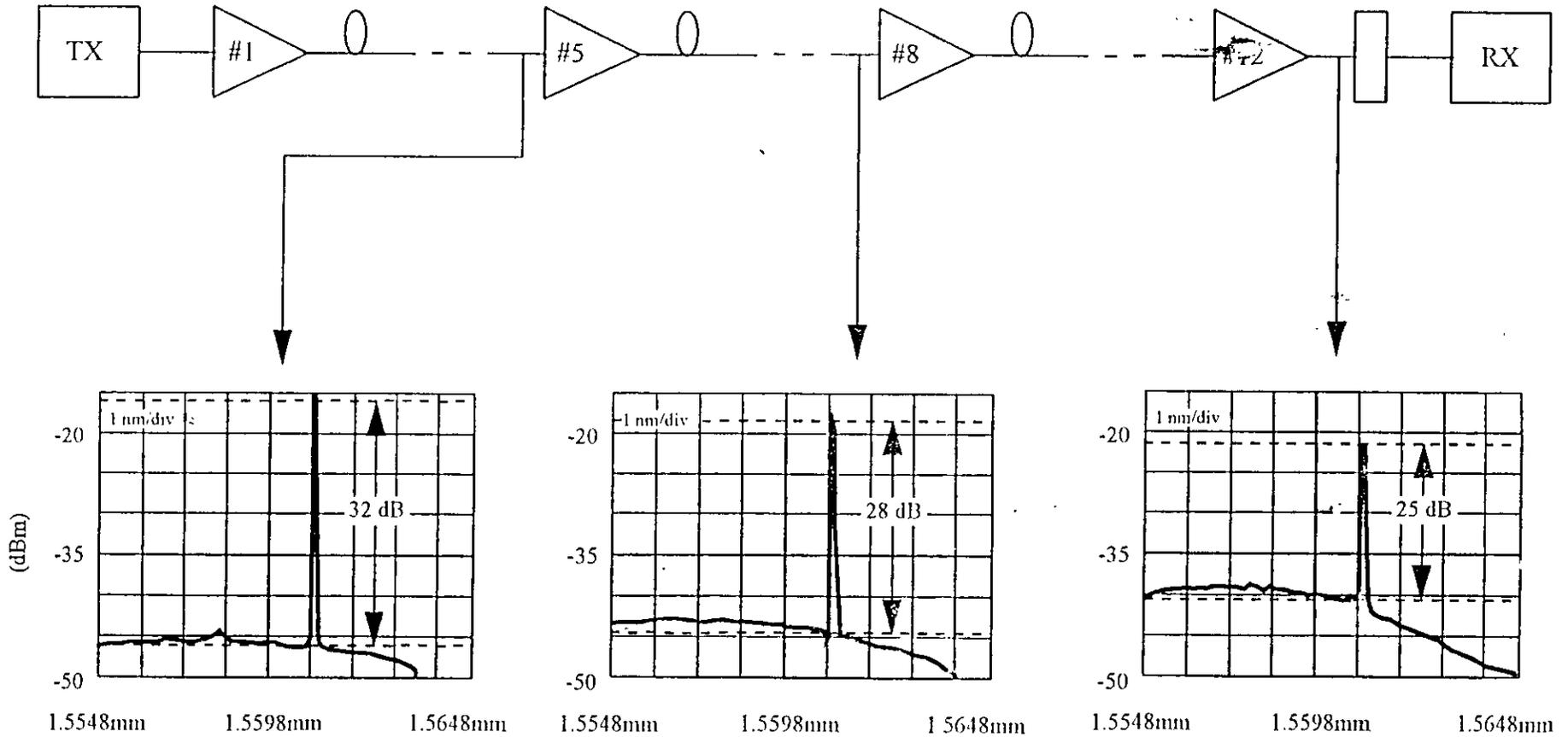
**SNR<sub>1/0</sub>**: Relación señal a ruido ( in / out ).

**Señal** : Número de fotones promedio.

**Ruido** : Fluctuación del número de fotones.

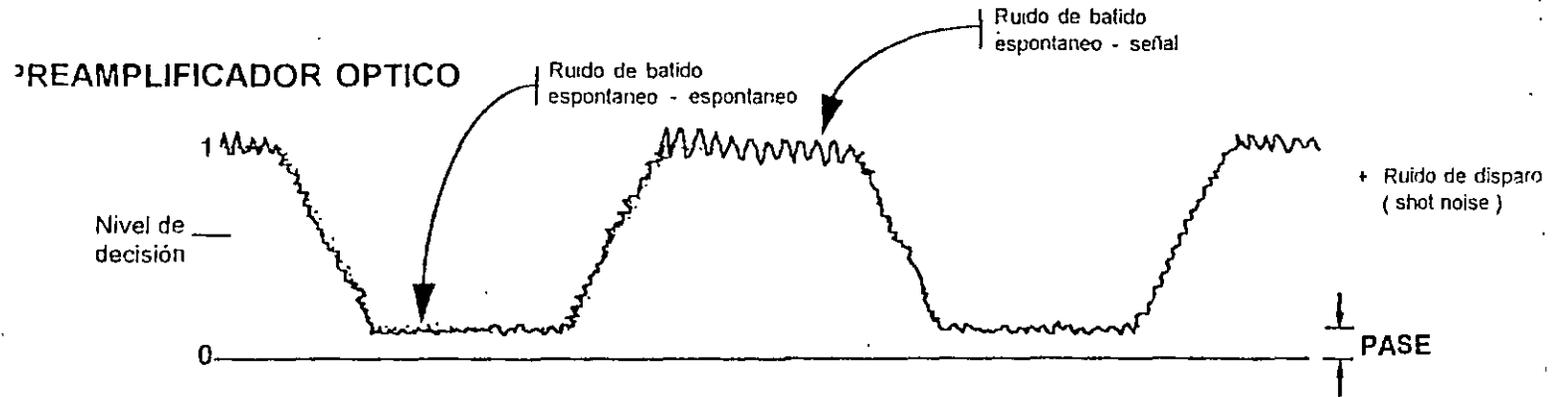
$\lambda_p$ (nm)	NF (dB)
980	3
1480	4.2

# ACUMULACION DE RUIDO EN UNA CADENA DE EDFAs



$$(NF)_N = (NF)_{\text{SENCILLO}} + 10 \log N$$

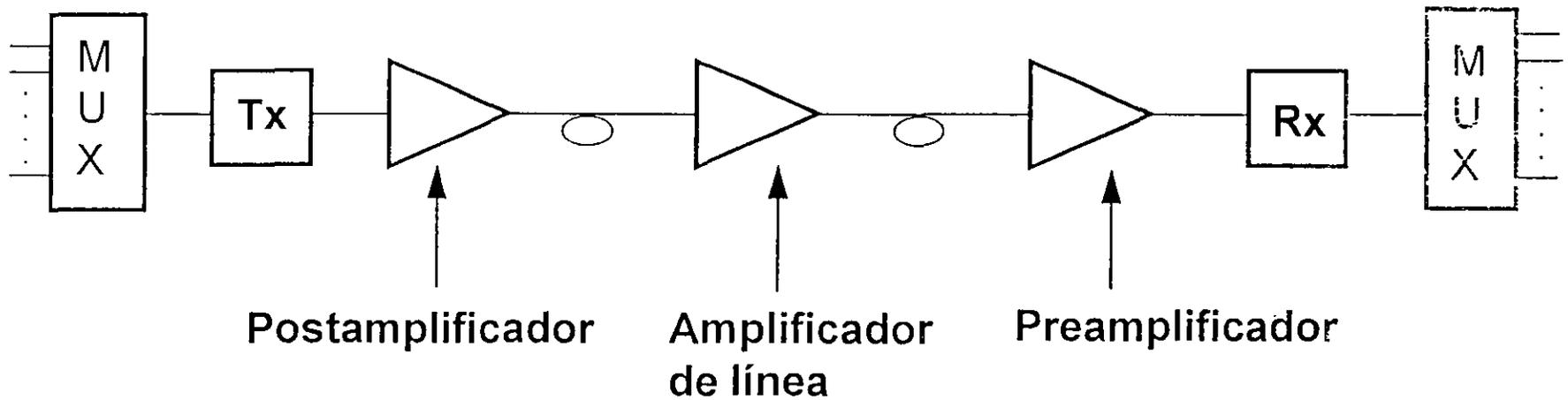
# RUIDO EN EL RECEPTOR



BASE : Potencial de Emisor

# AMPLIFICADORES OPTICOS : PARTE II

## DIFERENTES APLICACIONES DE AMPLIFICADORES OPTICOS

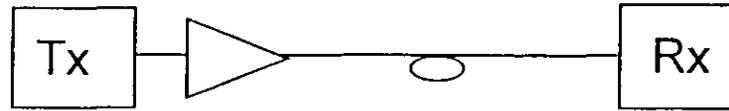


# CONFIGURACIONES EDFA EN SISTEMAS SIN REPETIDORES

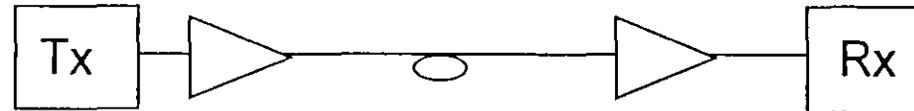
Sistema Convencional



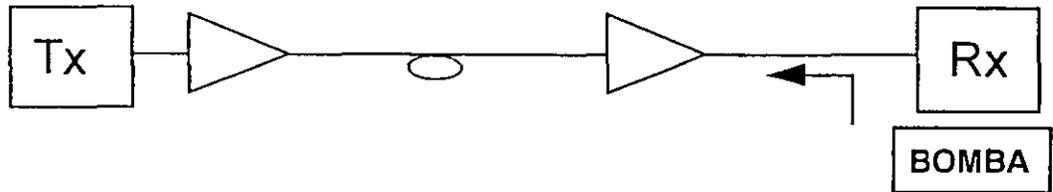
Postamplificador



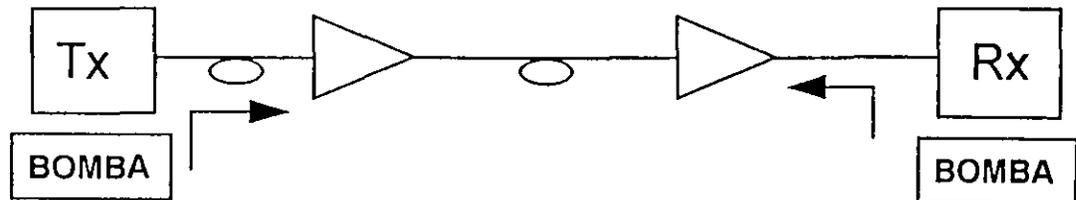
Postamplificador + Preamplificador



Postamplificador + Preamplificador  
bombeo remoto

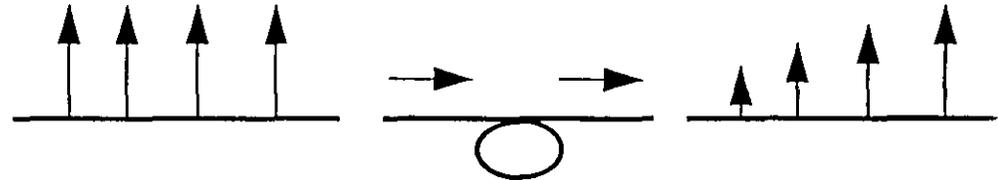


Postamplificador + Preamplificador  
bombeo remoto      bombeo remoto



# EFFECTOS NO LINEALES

- DISPERSION RAMAN ESTIMULADA



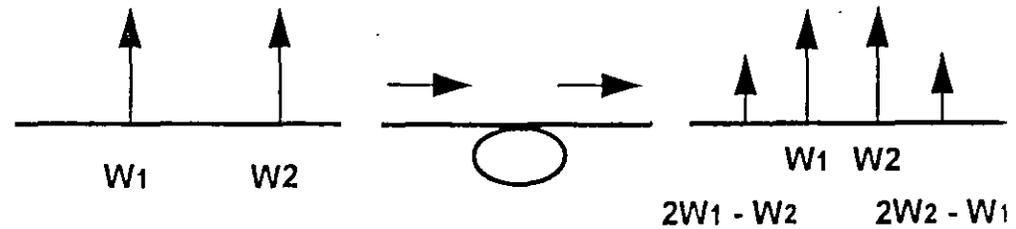
- DISPERSION BRILLOUIN ESTIMULADA

- AUTOMODULACION DE FASE

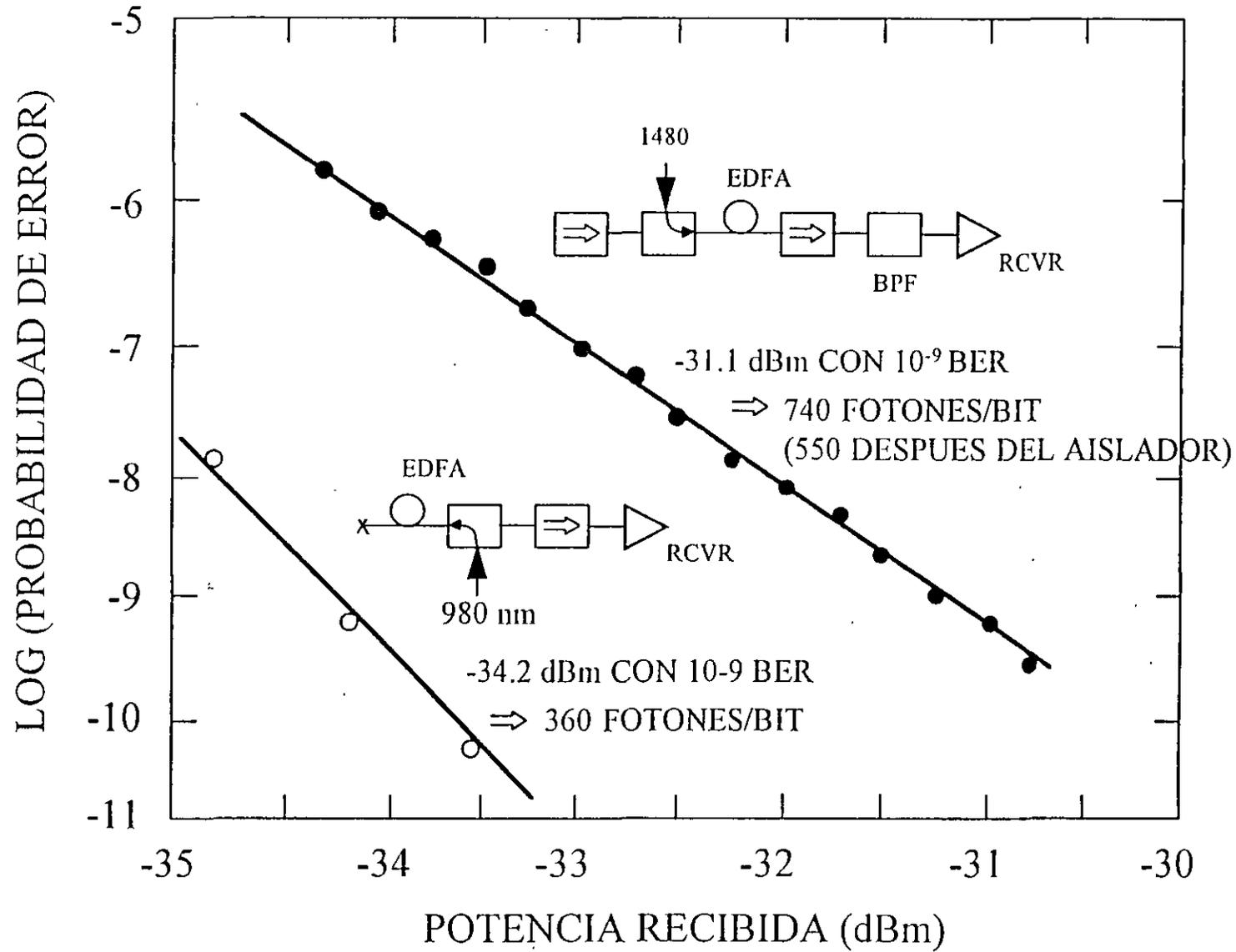


- MODULACION CRUZADA DE FASE

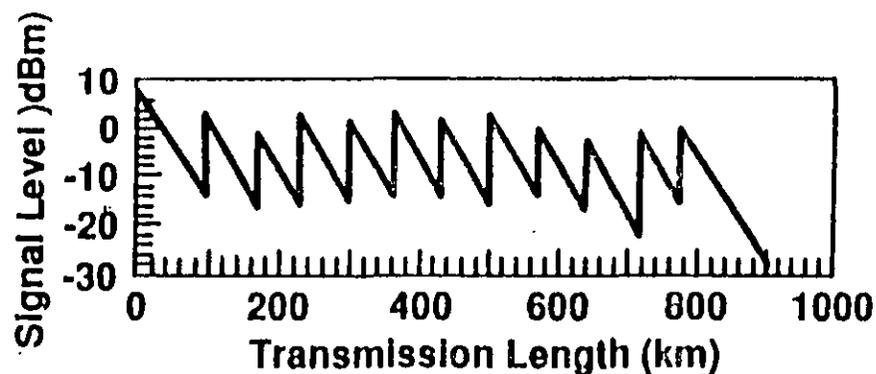
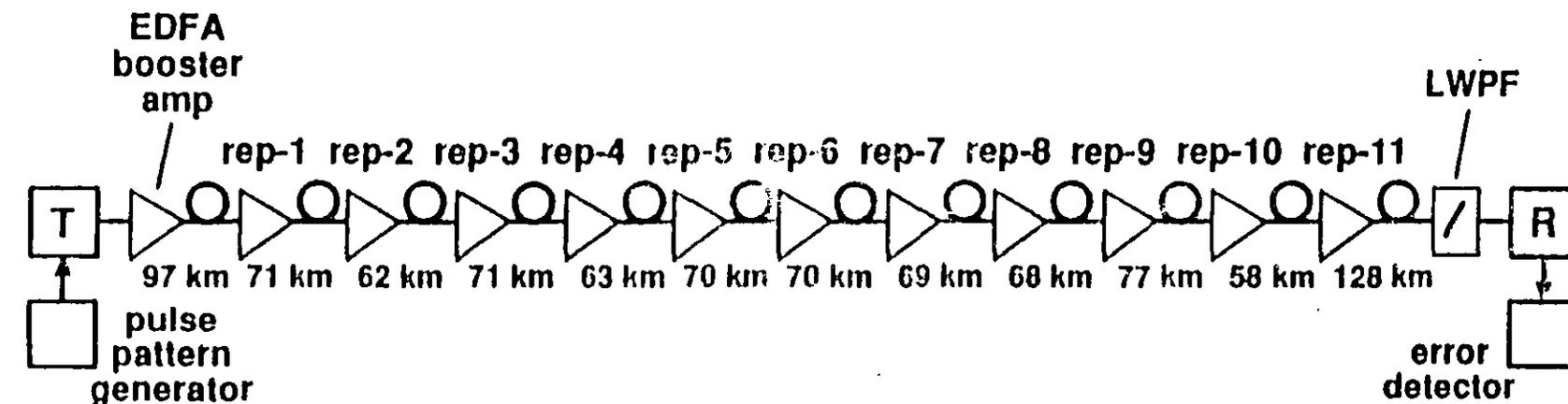
- MEZCLADO DE 4 ONDAS



# PREAMPLIFICADORES BOMBEADOS CON 980 nm VS 1480 nm A 8Gb/s

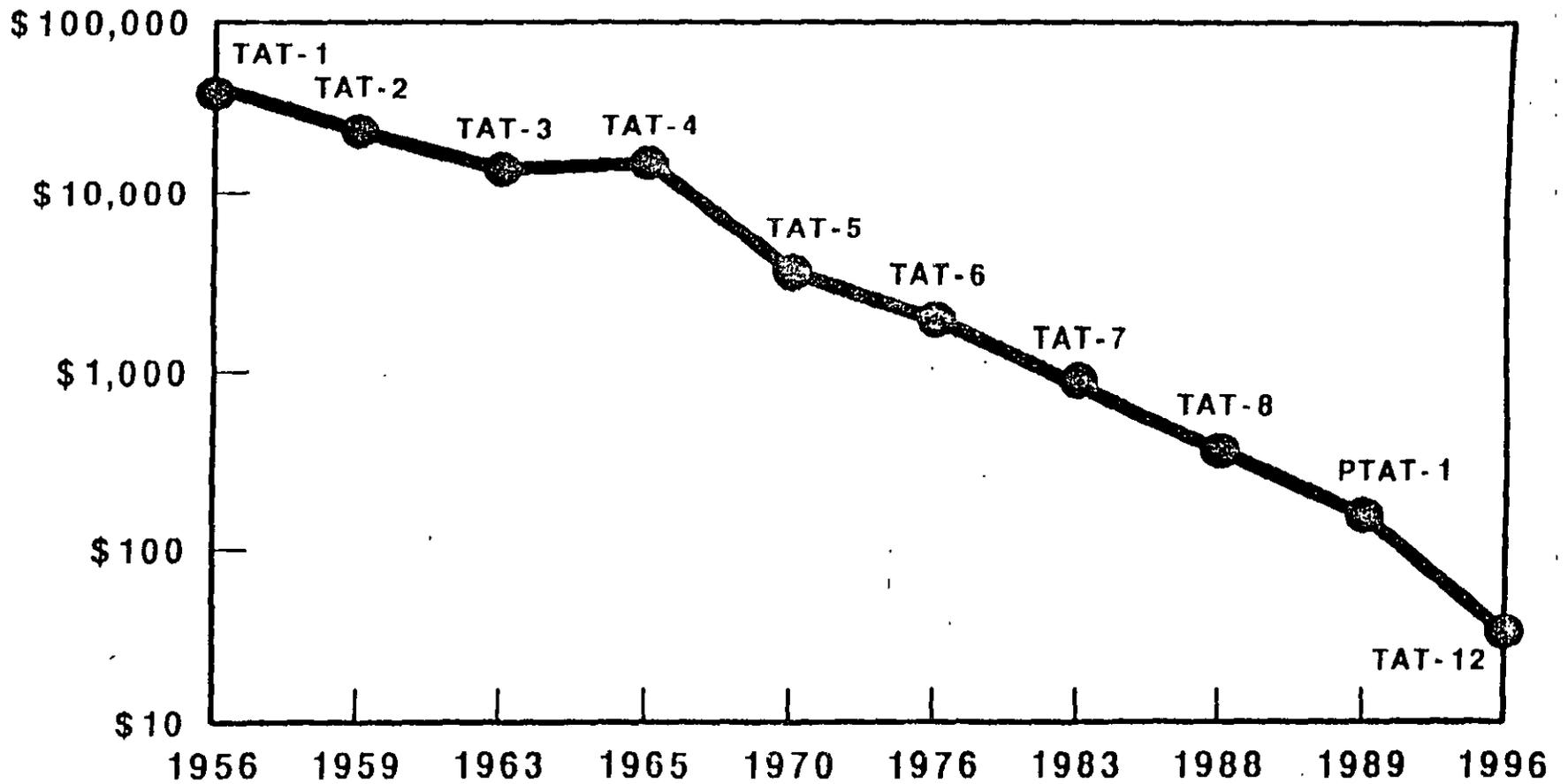


# TRANSMISION SOBRE 904 km UTILIZANDO EDFA'S COMO REPETIDORES EN LINEA

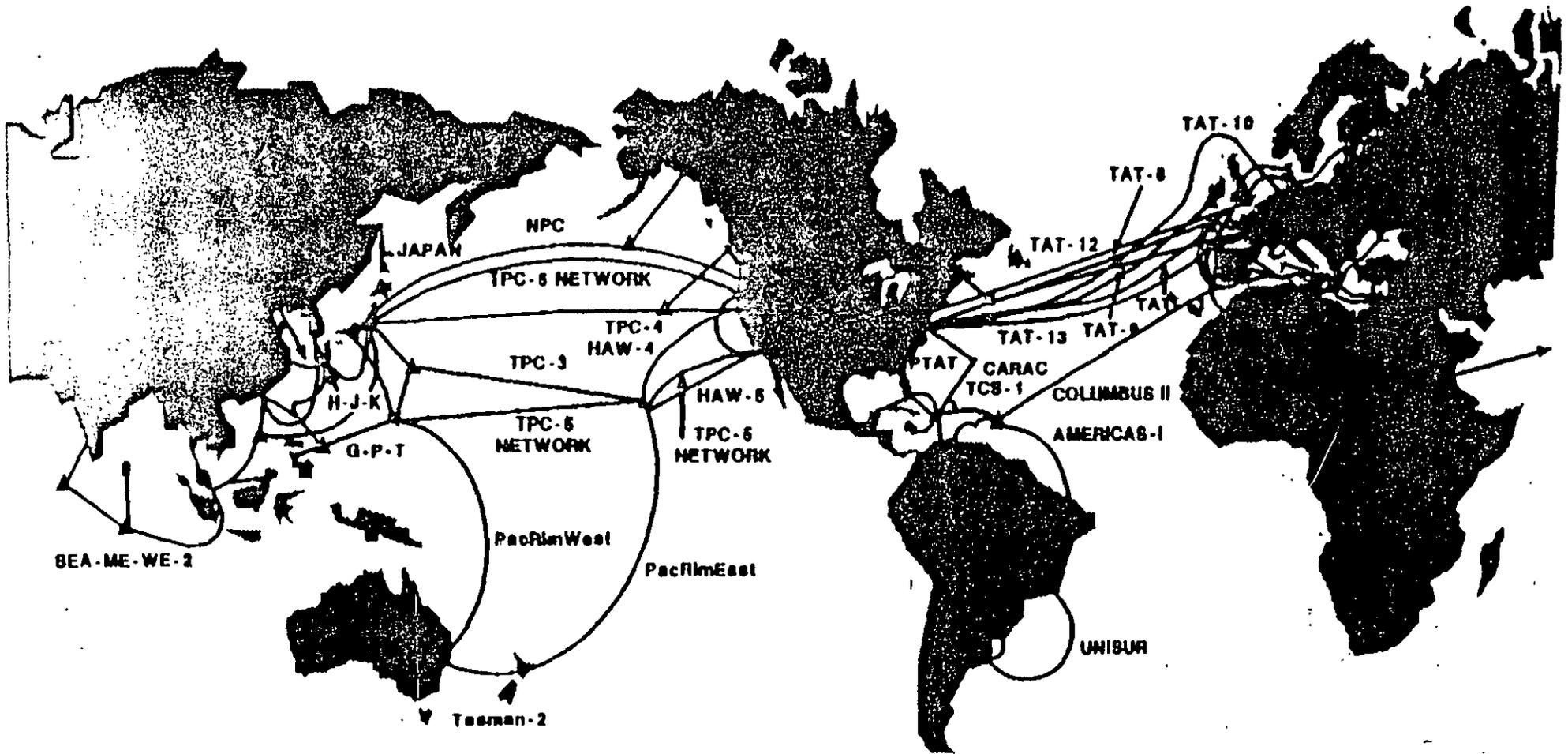


$10^{-9}$  BER:  
 $P_{rec.} = -33$  dBm  
 Penalty @ 904 km:  
 ~0.6 dB

# COSTO POR CIRCUITO POR AÑO DE SISTEMAS TRASATLANTICOS



# WORLDWIDE INTELLIGENT NETWORK



# EL AMPLIFICADOR OPTICO COMO ELEMENTO DE RED

## FUNCIONES

---

- Amplificación de una señal óptica a 1550 nm
- Monitoreo de la señal óptica y de la unidad enchufable de hardware
- Detección de pérdida de señal (LOS)
- Apagado automático del laser (ALS)
- Monitor de la fuente de bombeo
- Provisión de la interface de señalización a la unidad de administración y comunicaciones del elemento de red
- Regulación del filtro óptico pasabanda de supresión de emisión espontanea amplificada (ASE)

# Preamplificador

Ganancia fibra a fibra con una potencia de entrada de - 30 dBm	: 25 dB
Longitud de onda de operación	: (1530 - 1560) nm
Figura de ruido	: < 6 dB
Cambio de potencia de salida debido a polarización	: < 0.5 dB
Número de lasers de bombeo	: 1
Longitud de onda de bombeo	: (975 - 985) nm
Niveles máximos de potencia de la banda y la señal	: < 10 dBm

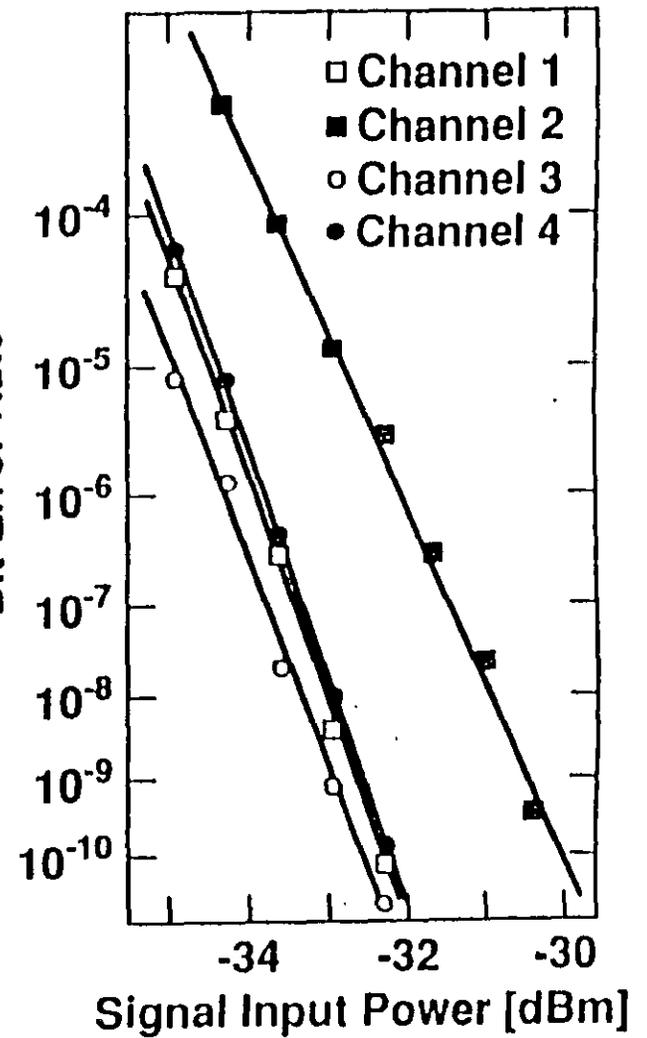
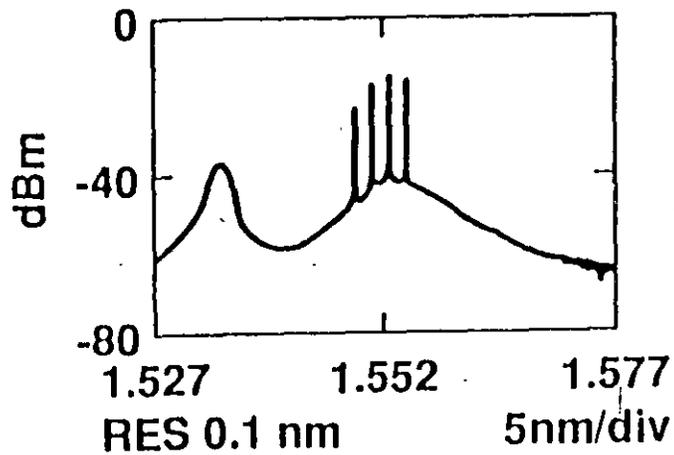
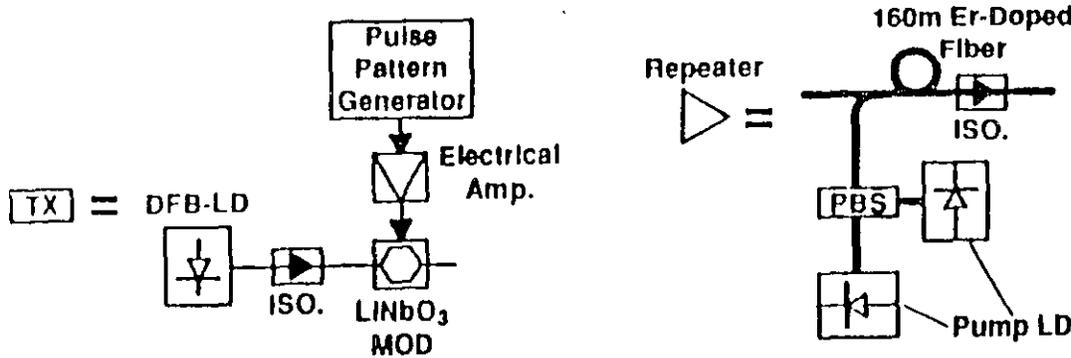
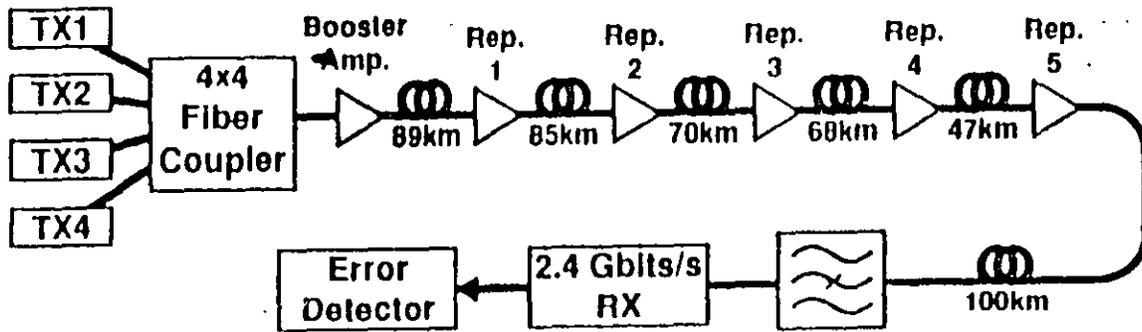
## CARACTERISTICAS DE LOS EDFA'S DISPONIBLES COMERCIALMENTE

### Postamplificador

---

Potencia mínima de salida a - 5 dBm de potencia de entrada	: 14 dBm
Longitud de onda de operación	: (1530 - 1560) nm
Figura de ruido	: < 7 dB
Cambio de potencia de salida debido a polarización	: < 0.5 dB
Número de lasers de bombeo	: (1465 - 1490) nm
Niveles máximos de potencia de la bomba y la señal	: < 17 dBm

# EXPERIMENTO DE SISTEMA CON REPETIDOR WDM

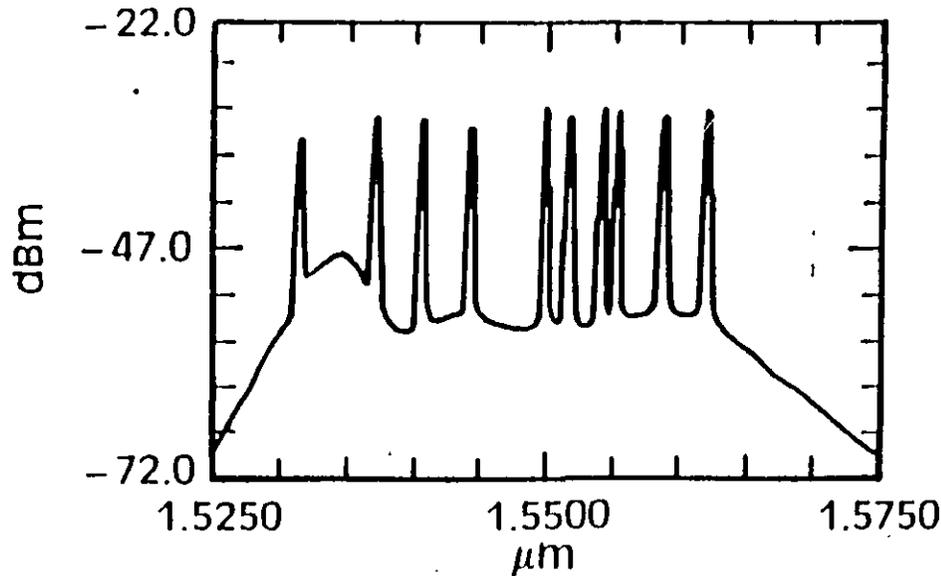
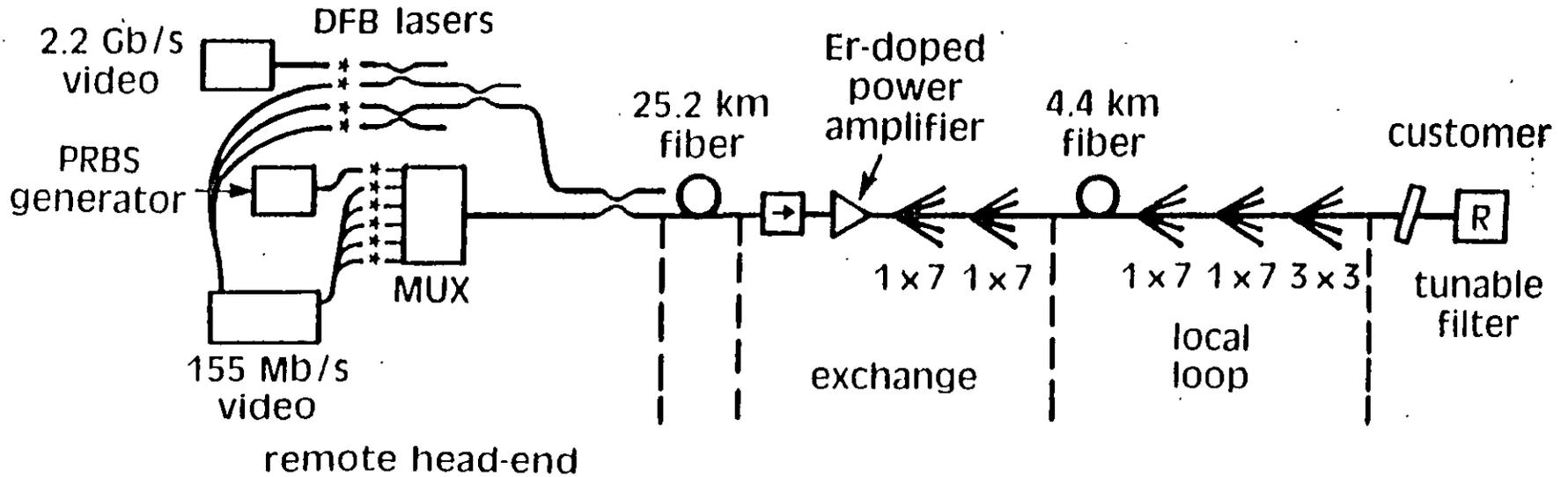


after Taga et.al. OFC '90

## TRANSMISIÓN POR SOLITONES

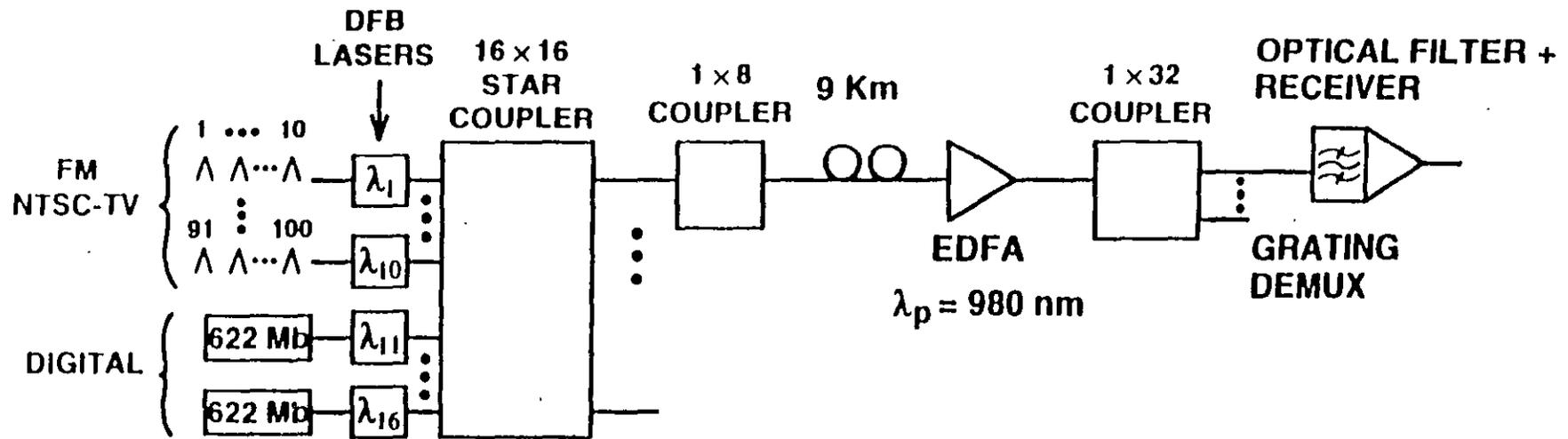
- Un solitón es un pulso que se propaga sin distorsión (ideal para comunicaciones).
- Efecto Kerr: Cuando la intensidad de luz excede cierto nivel, ondas de luz de la misma longitud de onda pero diferente intensidad viajan a diferentes velocidades.
- El efecto Kerr compensa la dispersión.
- El EDFA compensa la atenuación.
- Resultados de laboratorio: 2.5 Gb/s 14000 Km..  
5 Gb/s 10000 Km..

# RED "BROADCAST" WDM UTILIZANDO UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA EDFA



160 PAL video channels  
7203 network users

# DISTRIBUCION DE FORMATOS MULTIPLES DE SEÑAL



- Equivalent to 4096 subscribers
- $1527 \text{ nm} < \lambda_s < 1551 \text{ nm}$

after WAY et al '90 Bellcore

# NUEVOS TIPOS DE FIBRAS OPTICAS

## *AT&T TRUEWAVE/CORNING GLASS LS*

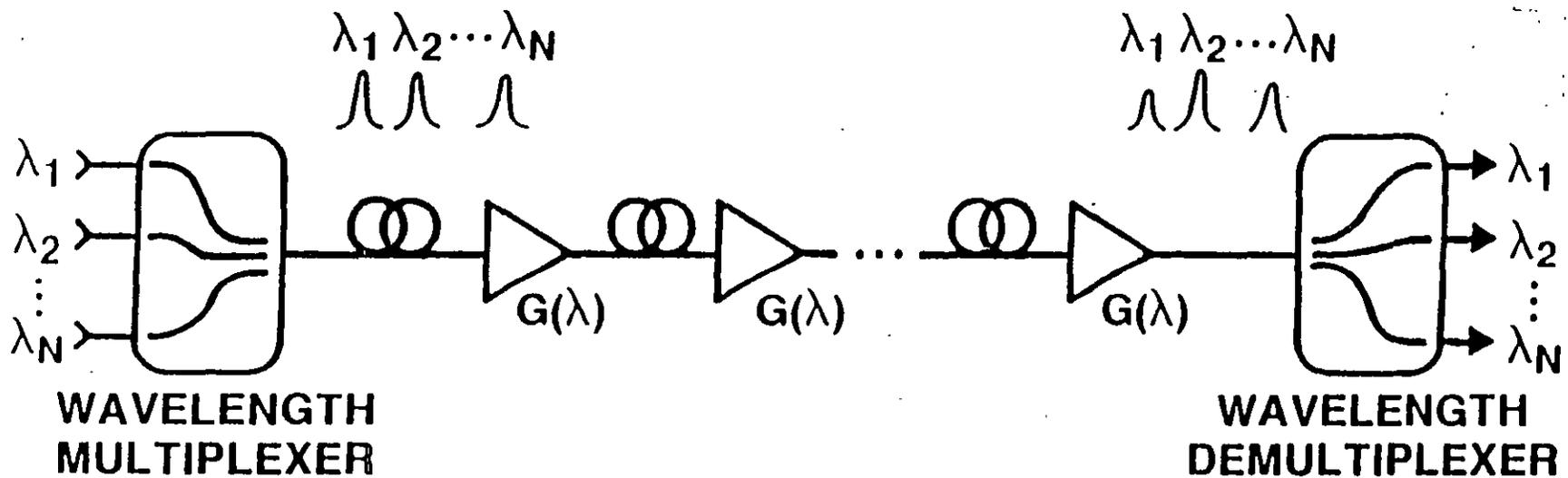
- Implantación de los sistemas de transmisión WDM de alta capacidad del futuro.
- La utilización de las fibras de dispersión corridas son amplificadores EDFA. Presenta una limitación de desempeño.
- El nuevo diseño de fibra óptica minimiza el problema.
- Efecto responsable: mezclado de 4 ondas. (4WM: FOURWAVE MIXING). Produce interferencia entre señales WDM e incrementa la tasa de errores.
- Solución: Introducción de una pequeña cantidad de dispersión cromática ( $2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{Km})$ ). Perfil de índice: triangular.
- Resultado: Transmisión de 10 Gb/s por cada longitud de onda.

## FIBRAS SUGERIDAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE REDES DE TRANSMISIÓN

LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN	DISPERSIÓN NORMAL	DISPERSIÓN CORRIDA	SUPRESORA 4WM
Un canal a 1310 nm.	X	-	-
WDM un canal a 1310 nm y otro a 1550 nm	X	-	-
Un canal a 1550	-	X	X
Dos canales separados ampliamente a 1550 nm	-	X	X
WDM densa a 1550nm.	-	-	X

# TENDENCIAS TECNOLOGICAS

## TRANSMISION OPTICA POR MULTIPLEXAJE EN EL DOMINIO DE LA LONGITUD DE ONDA (WDM)



### ISSUES:

- OPTICAL AMPLIFIER SATURATION POWER
- SATURATION-INDUCED CROSSTALK
- FOUR-PHOTON MIXING
- CHANNEL-TO-CHANNEL GAIN UNIFORMITY



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

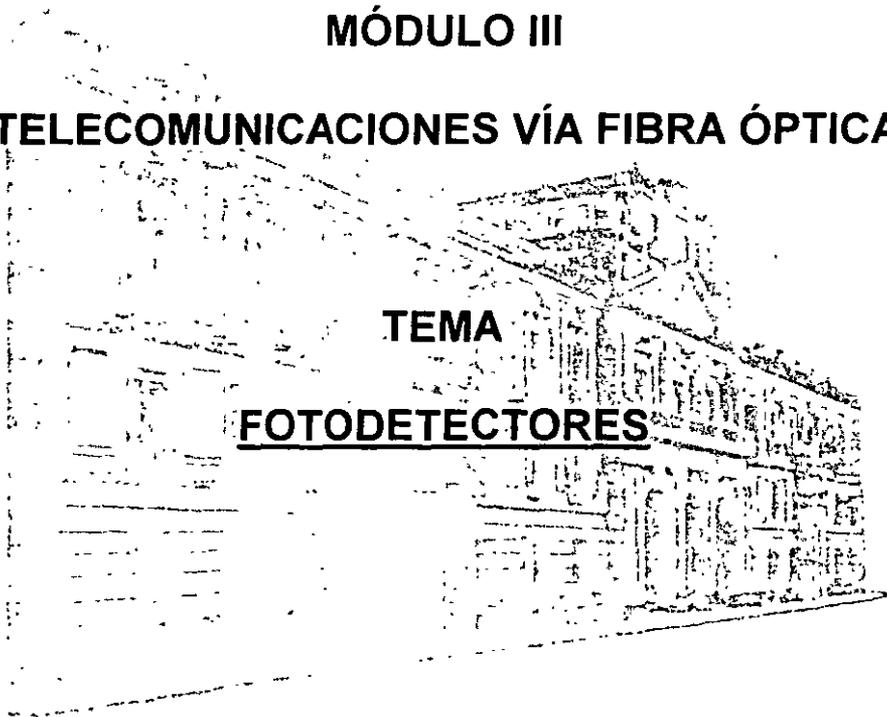
**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**FOTODETECTORES**

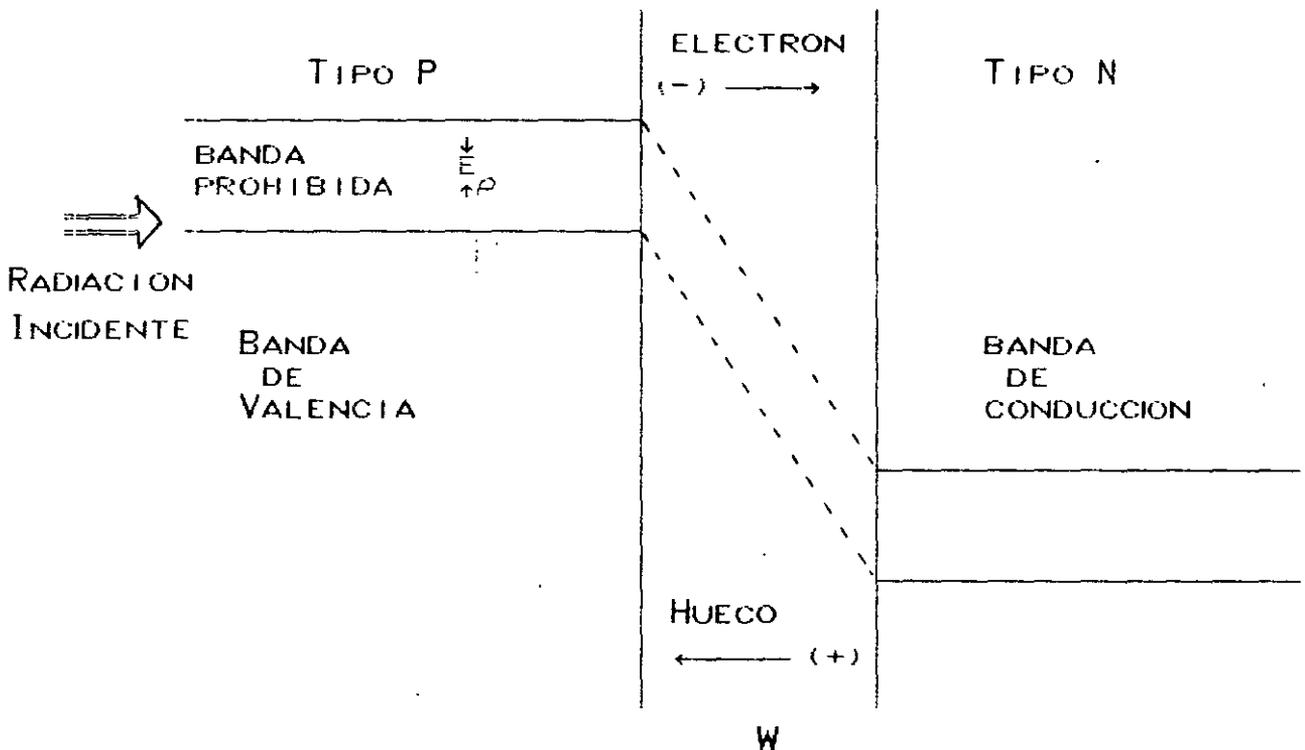
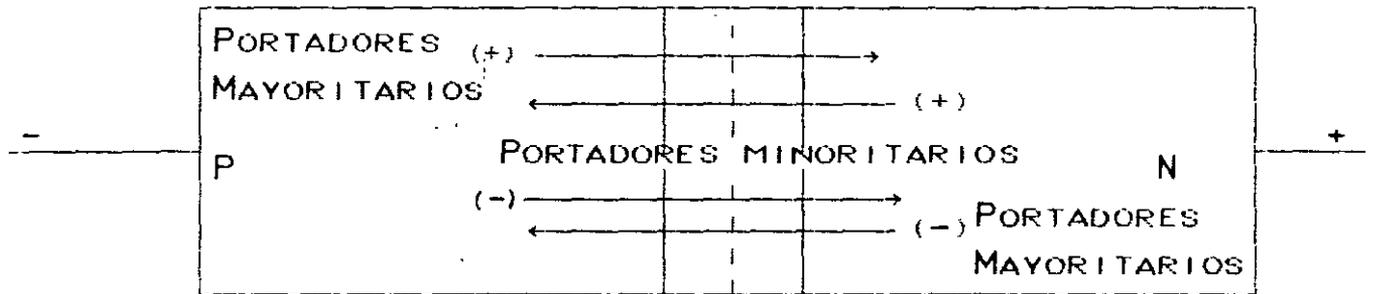


**CONFERENCISTA  
DR. HIDELBERTO JARDÓN  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

# DETECTORES

PARA LOS SISTEMAS DE  
TELECOMUNICACIONES  
OPTICOS.  
FOTODIODOS

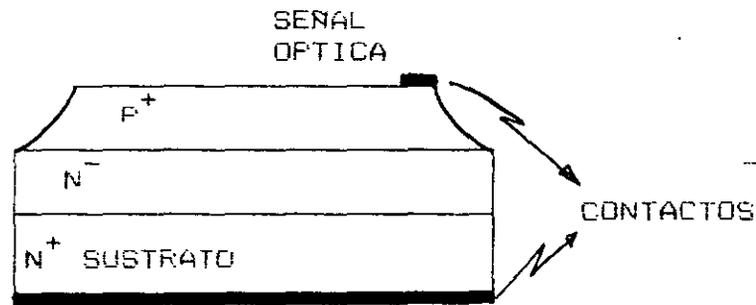
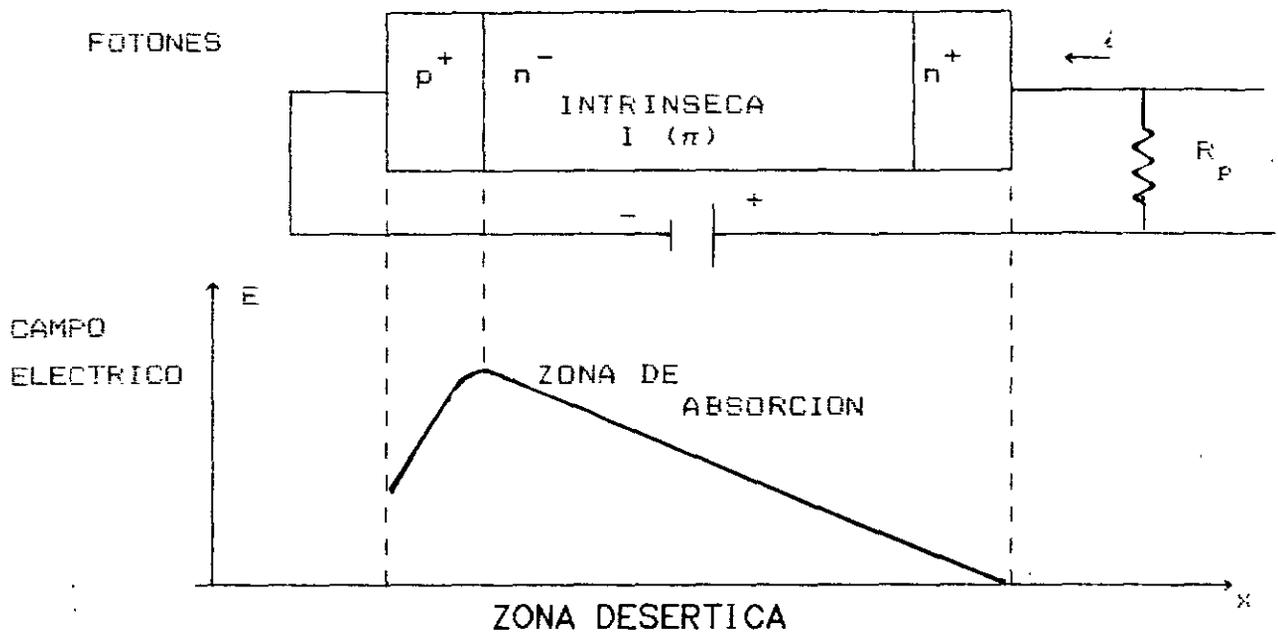
{ PIN (SEMICONDUCTOR PUVO (I) EN  
MEDIO DE UN TIPO P Y UN TIPO N).  
APD (FOTODIODO DE AVALANCHA).



PARA UNA POLARIZACION INVERSA

SE FORMA UNA ZONA LIBRE DE PORTADORES

$W = \text{ANCHO}$  { LA DENSIDAD DE IMPUREZAS  
VOLTAGE APLICADO.



EL PROCESO DE ABSORCION DE POTENCIA OPTICA OBEDECE A LA ESTADISTICA DE FERMI-DIRAC.

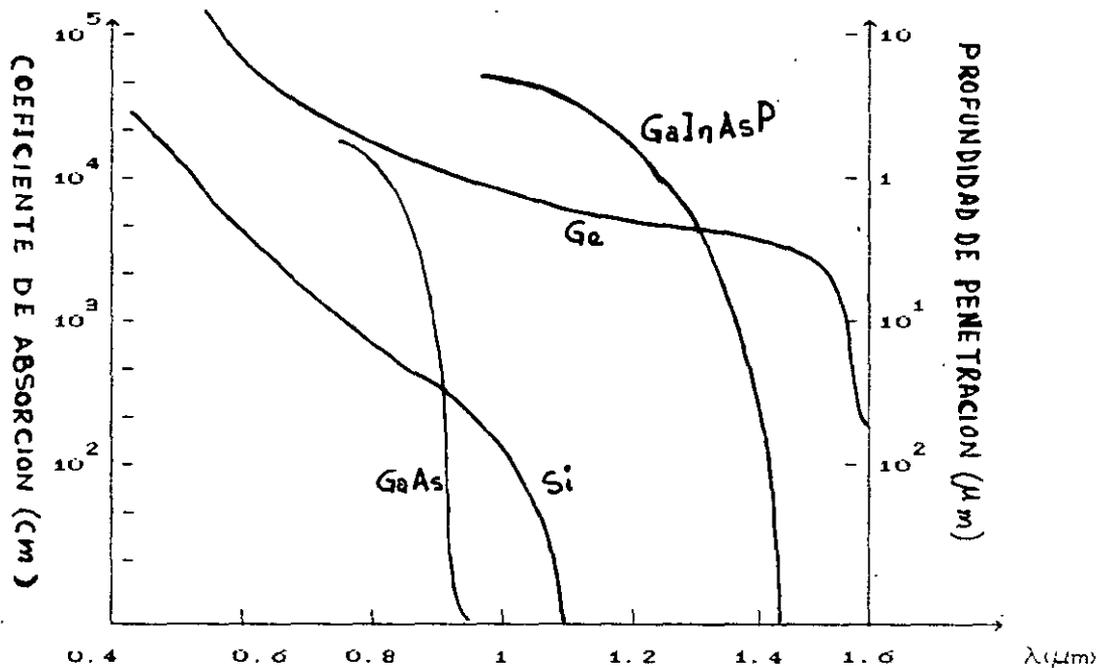
$$P_L(x) = P_L(0) (1 - e^{-\alpha x})$$

$P_L(x)$  - POTENCIA OPTICA A LA DISTANCIA  $x$  DE LA SUPERFICIE DE ENTRADA DEL MATERIAL (INCIDENCIA NORMAL).

$P_L(0)$  - POTENCIA OPTICA QUE LLEGA AL MATERIAL ( $x=0$ )

$\alpha$  - COEFICIENTE DE ABSORCION  $\rightarrow$  PARAMETRO DEL MATERIAL QUE RELACIONA LA LONGITUD DE ONDA ( $\lambda$ )

$L = \frac{1}{\alpha}$  - LONGITUD MEDIA DE DIFUSION DE LOS FOTONES DESDE SU ENTRADA AL MATERIAL HASTA LA ABSORCION COMO RESULTADO SE TIENE LA LIBERACION DE UN PAR ELECTRON-HUECO



$$\lambda_c = \frac{h c}{E_g} = \frac{1.24}{E_g \text{ (eV)}} \mu\text{m} \rightarrow \text{Longitud de onda de corte.}$$

La efectividad de luz  $\Rightarrow$  señal eléctrica:  $\lambda < \lambda_c \Rightarrow h\nu > E_g$

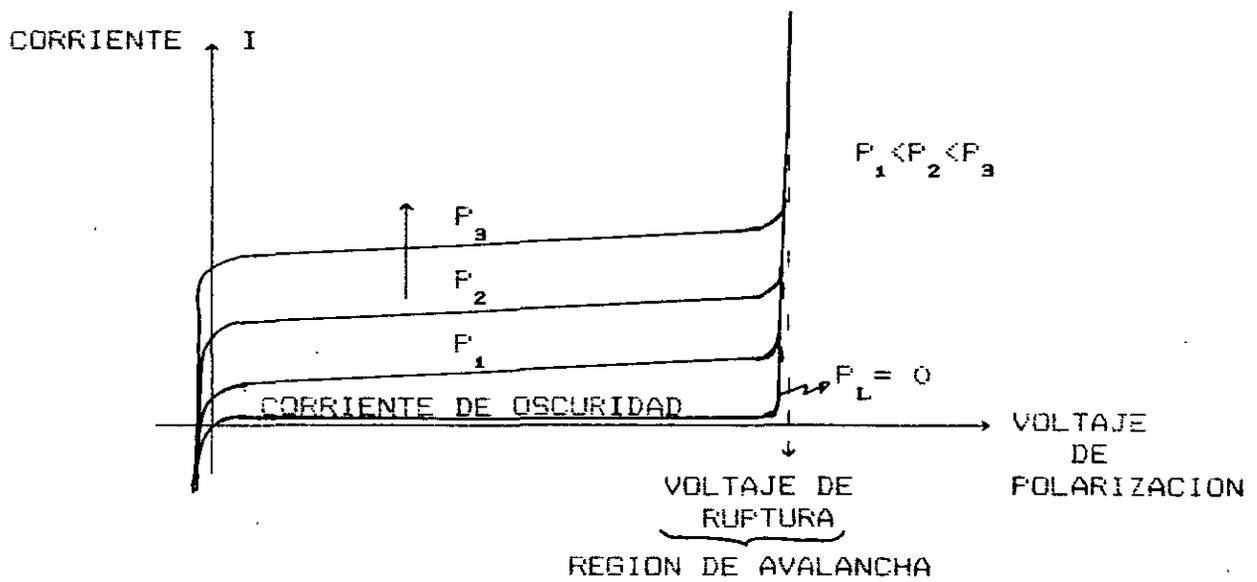
CURVAS CARACTERISTICAS

$$I = I_s \left[ 1 - e^{-\frac{qV}{\eta kT}} \right] + I(P_L) \Rightarrow \text{Para un diodo Polarizado Inversamente}$$

A temperatura Ambiente  $\frac{q}{kT} \approx 40 \Rightarrow e^{-\frac{qV}{kT}} \ll 1$

$$I = I_s + I(P_L)$$

Si  $P_L = 0 \Rightarrow I = I_s \Rightarrow$  Corriente de Oscuridad.



### RESPONSIVIDAD

ESTE PARAMETRO RELACIONA LA RESPUESTA DEL FOTODIODO DE ACUERDO A SU EXCITACION.

$$R = \left. \frac{\partial I_f}{\partial P_L} \right|_{V = \text{cte}}$$

SI LA POTENCIA OPTICA INCIDENTE ES  $\Delta P_L = \frac{N_f}{\Delta t} h\nu$

$N_f$  = No. DE FOTONES.

$h\nu$  = ENERGIA DEL FOTON

$$\begin{cases} h = \text{cte DE PLANK} \approx 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \\ \nu = c/\lambda \ (\lambda = \text{LONGITUD DE ONDA}) \\ c = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} \end{cases}$$

LA FOTOCORRIENTE  $\Rightarrow \Delta I_f = \frac{N_e}{\Delta t} q$

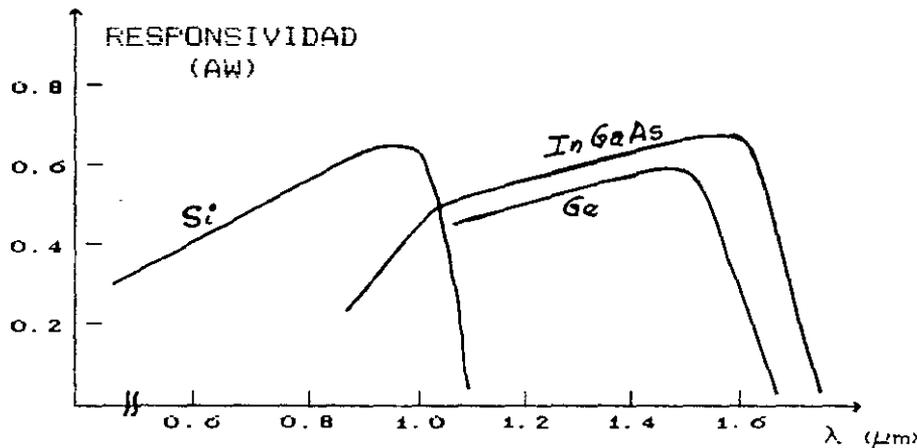
$N_e$  = No. DE ELECTRONES LIBERADOS.

$q$  = CARGA DE ELECTRON.

$$R = \frac{N_e}{N_f} \cdot \frac{q}{h\nu}$$

$$R = \eta \frac{c}{h\nu} = \eta \frac{\lambda (\mu\text{m})}{1.24} \left( \frac{\text{A}}{\text{W}} \right)$$

$\eta$  = EFICIENCIA CUANTICA



$$R = \frac{I_f}{P_L} = \eta \frac{q}{h\nu}$$

$$\eta = \frac{I_f/q}{P_L/h\nu} \Rightarrow \text{NUMERO DE ELECTRON HUECO LIBERADOS POR FOTON INCIDENTE.}$$

### VELOCIDAD DE RESPUESTA Y ANCHO DE BANDA

- TIEMPO DE TRANSITO: DE LOS FOTOGENERADORES
- TIEMPO DE TRANSITO: DE LOS PORTADORES DE CARGA.
- CONSTANTE: FORMADA POR LOS COMPONENTES PROPIOS Y DEL CIRCUITO EXTERNO.

PARA UN ANCHO DE LA ZONA DESENETICA W EL TIEMPO DE TRANSITO ES:

$$\tau_d = \frac{w}{V_d}$$

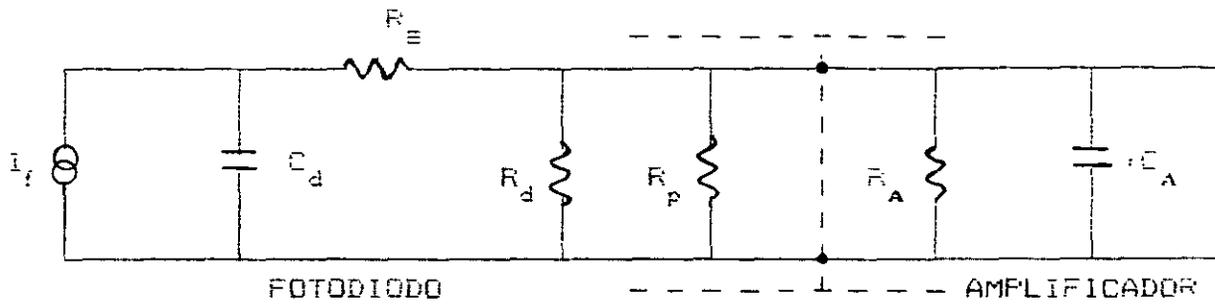
$$V_d = \mu E \left\{ \text{VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO.} \right.$$

$\mu$  = MOVILIDAD DE LOS PORTADORES.

MATERIAL	MOVILIDAD	
	ELECTRONES $\mu m^2/Vs$	HUECOS $\mu m^2/Vs$
Ge	3900	1900
Si	1350	480
GeAs	8000	250

CONSTANTE DE TIEMPO

$$\tau \approx R_T C_T$$



$$C_d = C_j + C_p$$

$$C_j = \frac{eA}{W} \quad \text{CAPACITANCIA DE UNION DEL FOTODIODO.}$$

$C_p$  = CAPACITANCIA PARASITAS.

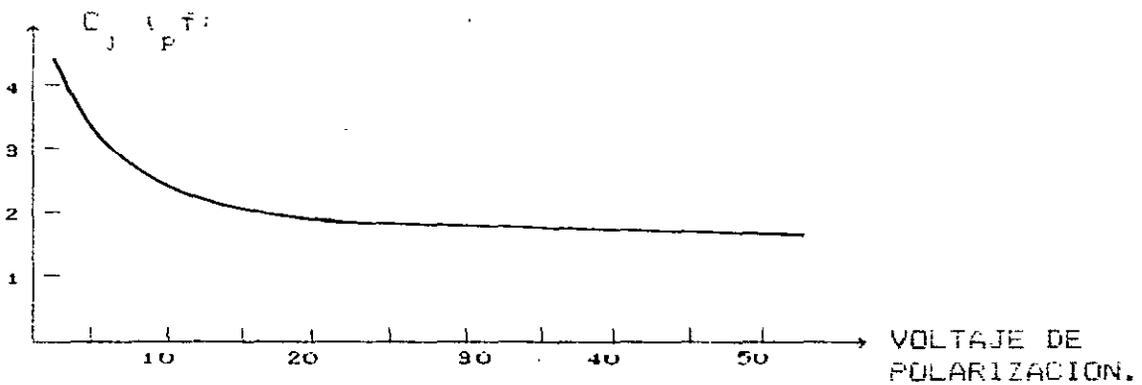
$$C_T = C_j + C_p + C_A$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_A}$$

$R_E$  = RESISTENCIA SERIE CON LA ZONA DESERTICA, DISMINUYE CON EL VOLTAJE DE POLARIZACION (5 - 50)

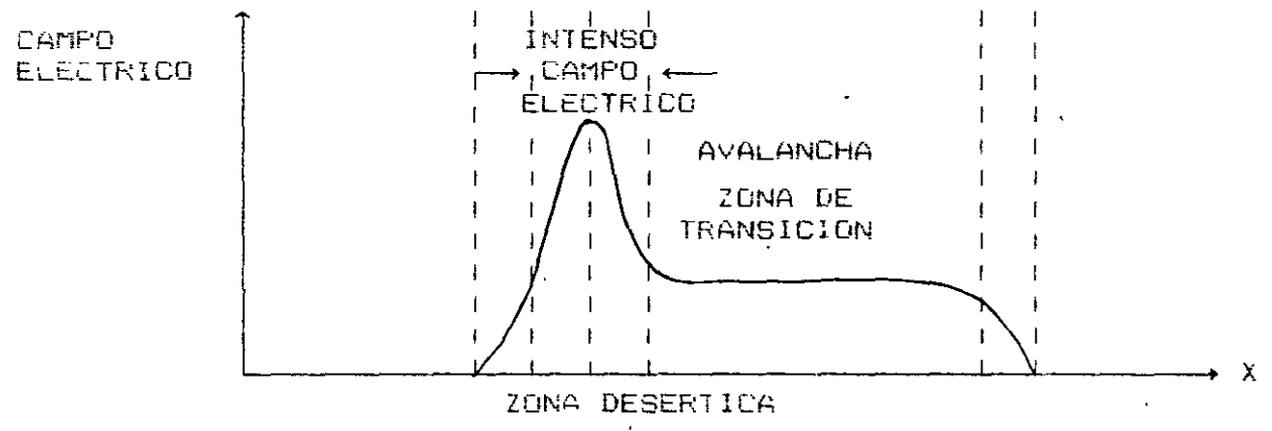
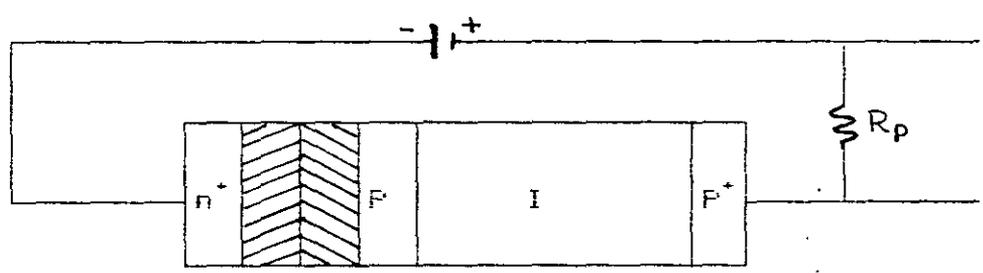
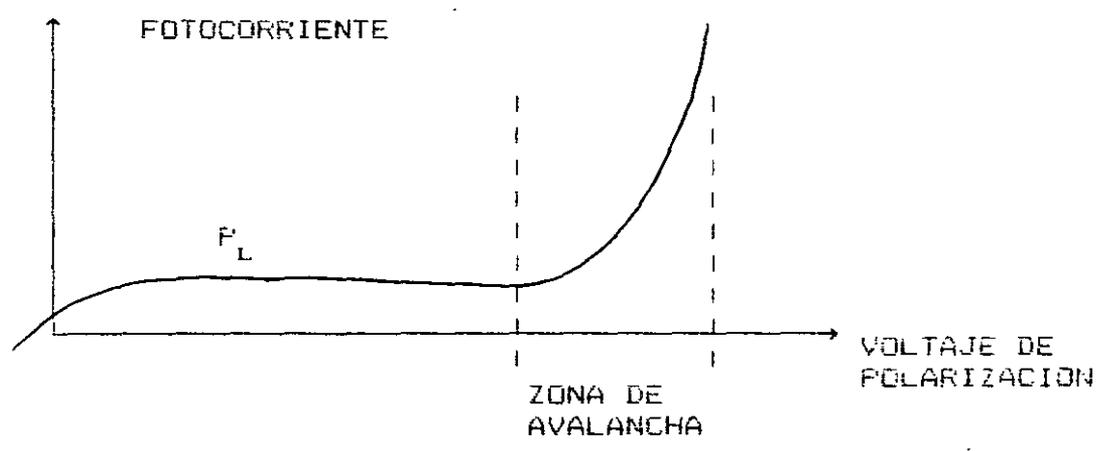
$$R_d \gg R_p$$

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi R_T C_T}$$



# FOTODIODO DE AVALANCHA

→ A P D ←

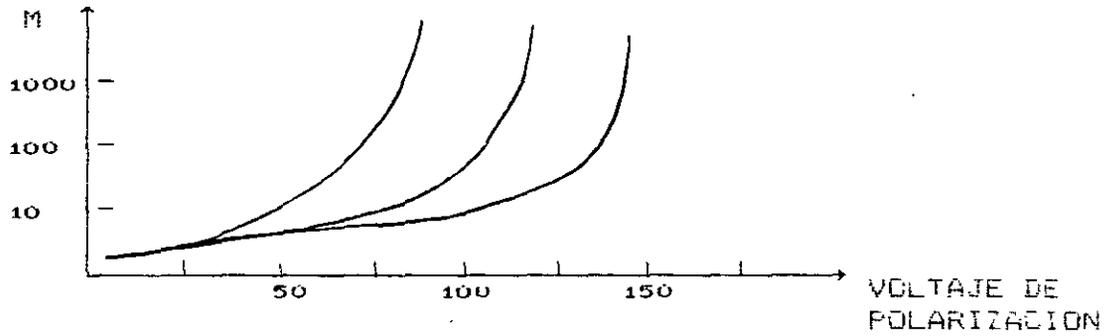


$$I = \langle M \rangle I_f = \langle M \rangle \eta \frac{q}{h\nu} P_L$$

$$M = \frac{I}{I_f} = \frac{1}{1 - \left( \frac{V}{V_B} \right)^n}$$

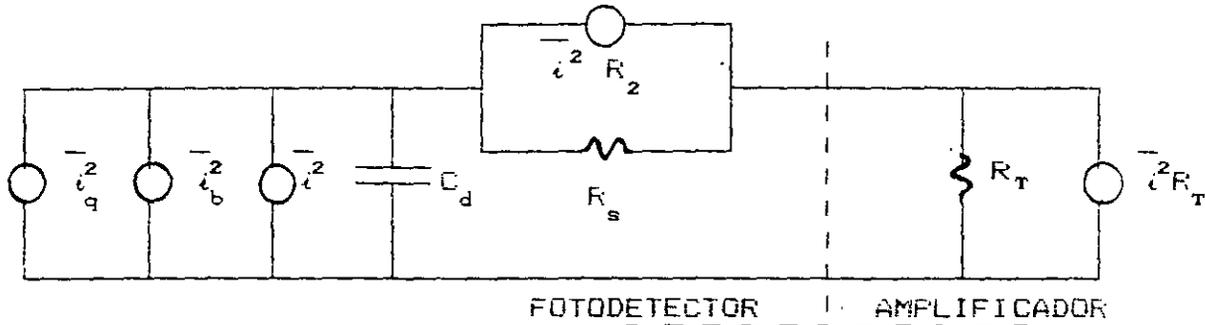
- I = CORRIENTE TOTAL.
- I<sub>f</sub> = FOTOCORRIENTE PRIMA.
- V<sub>B</sub> = VOLTAJE DE RUPTURA.
- V = VOLTAJE APLICADO.
- η = COEFICIENTE.

$$V_P \Rightarrow \begin{cases} 50 - 300 & \lambda = 850, \text{ nm.} \\ 10 - 50 & \lambda = 1300 \text{ nm.} \end{cases}$$



PARAMETROS	Si	PIN GaInAs	APD Si	APD Ge
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) Intervalo de Operacion.	0.4-10	1.0-1.6	0.4-1.0	0.4-1.8
Pico de Sensibilidad $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.8-0.7	1.0-1.4	0.6-0.9	1.0-1.4
Eficiencia Cuántica $\eta$	0.82	0.7	0.82	1.15
Corriente de oscuridad I (nA)	0.1-5.0	0.02-5.5	0.02-15	10-200
Tiempo de Subida $R_T \approx 50 \Omega$ $T_s$ (ns)	0.5-3	0.1-1.5	0.1-0.5	0.1-0.2

## RUIDO EN FOTODIODOS



DENSIDAD ESPECTRAL DEL RUIDO.

$$\frac{d}{df} \langle i^2 \rangle = I \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} I = \text{CORRIENTE TOTAL} \\ f = \text{FRECUENCIA} \end{array}$$

$$\langle i_T^2 \rangle = \overline{i_T^2} = \overline{i_q^2} + \overline{i_b^2} + \overline{i_d^2} + \overline{i_{R_s}^2} + \overline{i_{R_T}^2}$$

$$\overline{i_q^2} = 2q I_f \Delta f \quad \longrightarrow \quad \text{RUIDO PRODUCIDO POR EL PROCESO DE DETECCION - RUIDO CUANTICO.}$$

$$\overline{i_b^2} = 2q I_b \Delta f \quad \longrightarrow \quad \text{RUIDO PRODUCIDO POR RADIACION OPTICA - ESPURIA.}$$

$$\overline{i_d^2} = 2q I_d \Delta f \quad \longrightarrow \quad \text{RUIDO DEBIDO A LA CORRIENTE DE OSCURIDAD}$$

$$\overline{i_{R_s}^2} = \frac{4KT \Delta f}{R_s} \quad \longrightarrow \quad \text{RUIDO DEBIDO A LA RESISTENCIA SERIE "TERMICO"}$$

$$\overline{i_{R_T}^2} = \frac{4KT \Delta f}{R_T} \quad \longrightarrow \quad \text{RUIDO DEBIDO A LA RESISTENCIA TOTAL SERIE "TERMICO"}$$

PARA APD

$$\frac{d}{df} \langle i^2 \rangle = I \langle M^2 \rangle F \langle M \rangle$$

$F \langle M \rangle =$  FACTOR DE RUIDO DE EXCESO.

$$F \langle M \rangle = \langle M \rangle \left\{ (1-k) \left[ \frac{\langle M \rangle - 1}{\langle M \rangle} \right]^2 \right\}$$

$k =$  COEFICIENTE DE IONIZACION.

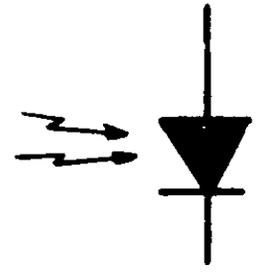
ES UNA MEDIDA DE DEGRADACION DEL PROCESO DE GANANCIA.

# RECEPTORES OPTICOS

## DETECTORES OPTICOS

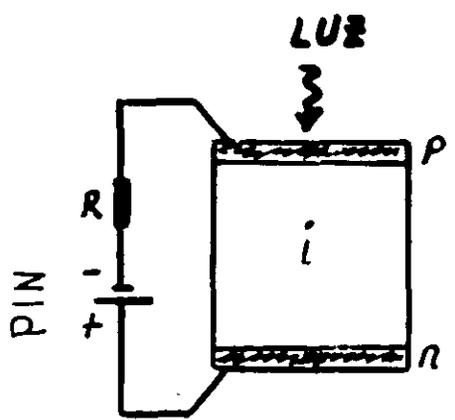
PIN

DE AVALANCHA

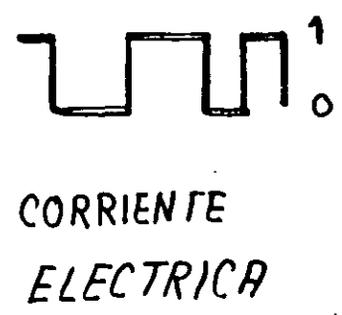
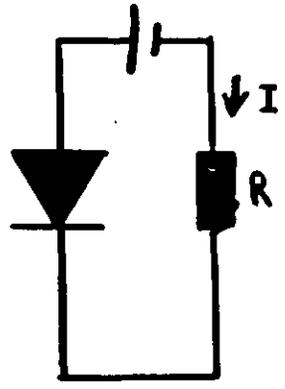
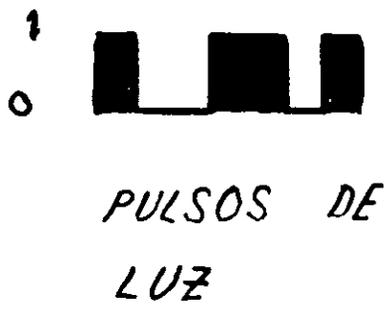
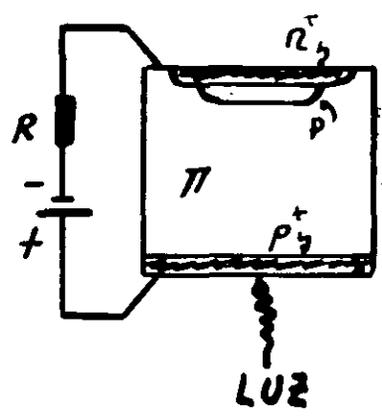


SIMBOLO DE UN FOTODETECTOR

ESTRUCTURA DEL PIN

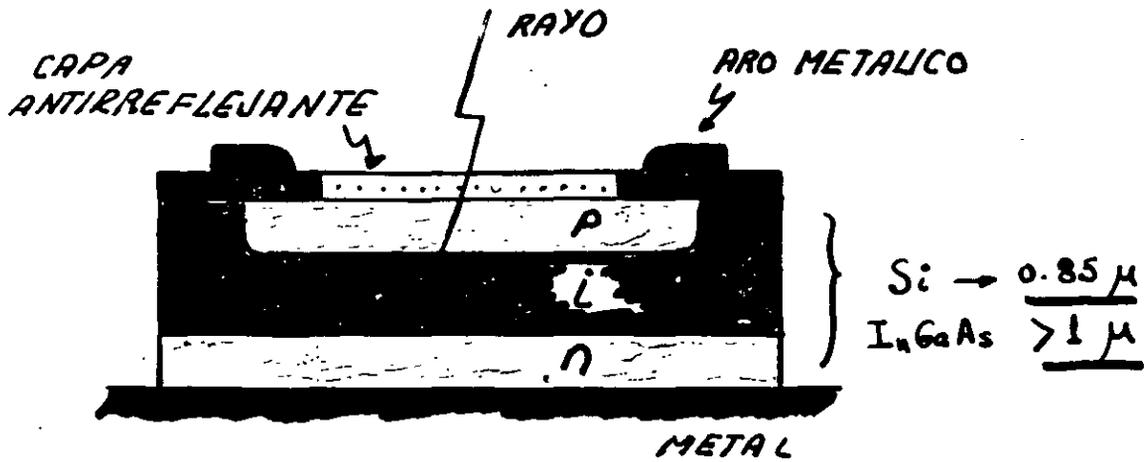


ESTRUCTURA DEL APD



# DIODO PIN

POLARIZACION 10-20V.



*SIMPLICIDAD, ESTABILIDAD, ANCHO DE BANDA.*

*GANANCIA UNITARIA*

DIODOS PIN

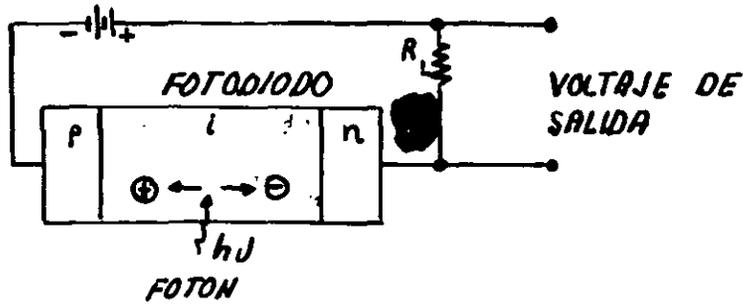


FIG. REPRESENTACION DE UN FOTODIODO PIN CON SU CIRCUITO DE POLARIZACION

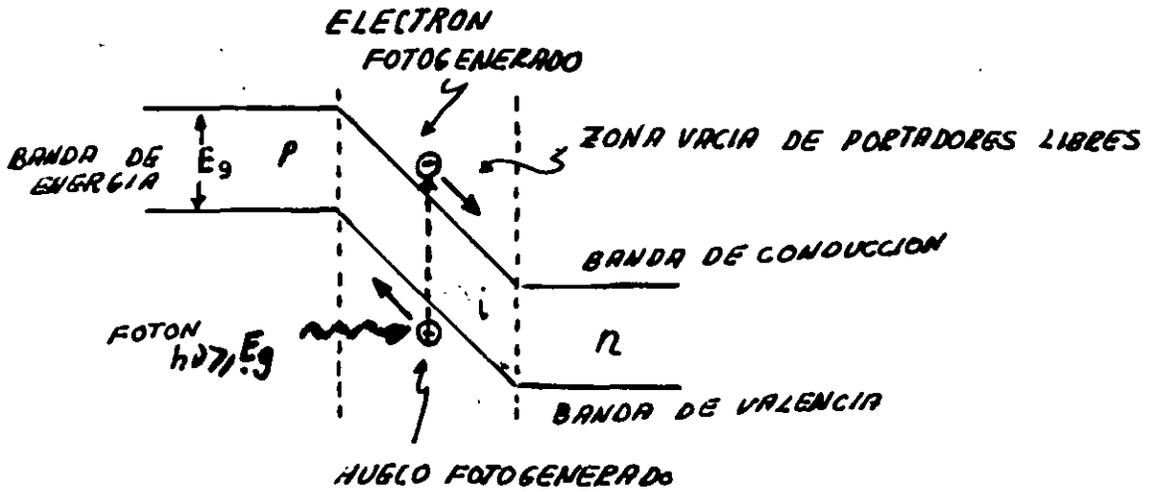
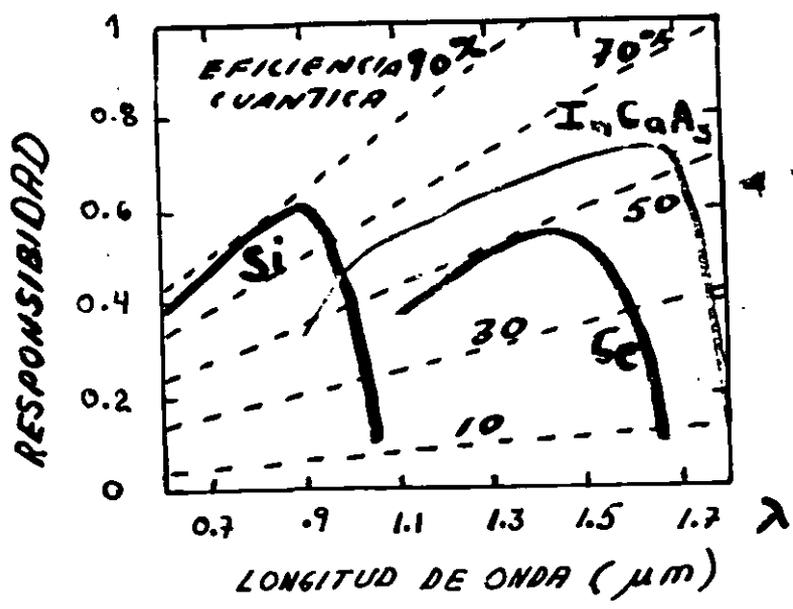


FIG. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LAS BANDAS DE ENERGIA DE UN FOTODIODO PIN. FOTONES CON ENERGIA  $\geq E_g$  PUEDEN GENERAR PARES ELECTRON-HUECO, LOS CUALES ACTUAN COMO PORTADORES DE LA FOTOCORRIENTE

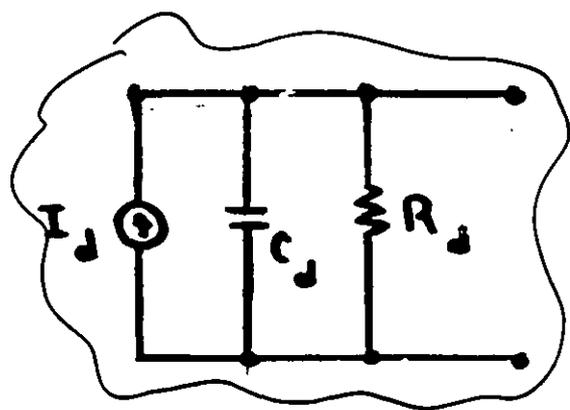
EFICIENCIA CUANTICA (η)

# RESPONSIBILIDAD R



MATERIALES PARA FOTODIODOS SEMICONDUCTORES

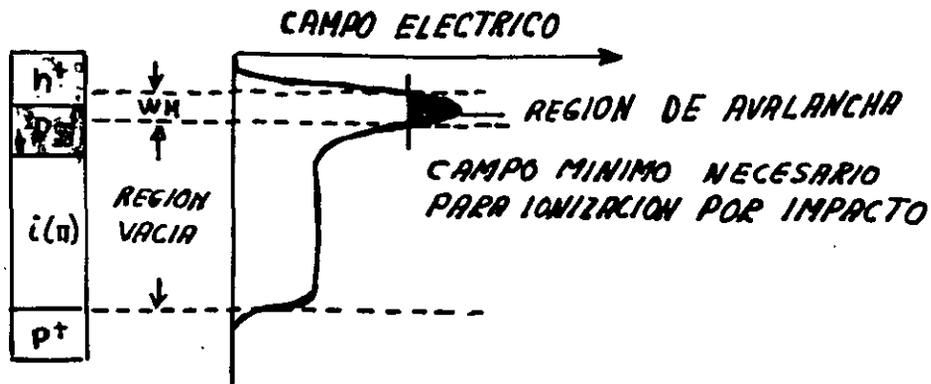
FIG COMPARACION DE LA RESPONSABILIDAD Y EFICIENCIA CUANTICA COMO FUNCION DE  $\lambda$ , DE FOTODIODOS PIN DE DIFERENTES MATERIALES



$I_d \Rightarrow 10nA - 100\mu A$   
 $C_d \Rightarrow 0.2 - 3pF$   
 $R_d > 10 M\Omega$   
 VALORES TÍPICOS

FIG. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN FOTODIODO PIN

# FOTODIODO DE AVALANCHA (APD)



## GANANCIA DE CORRIENTE (M)



DONDE

$I_M$  - ES EL VALOR DE LA CORRIENTE DE SALIDA (MULTIPLICADA)

$I_p$  - CORRIENTE PRIMARIA

$$M = M(\lambda, V, T)$$

$$i_e = R M P_{opt}$$

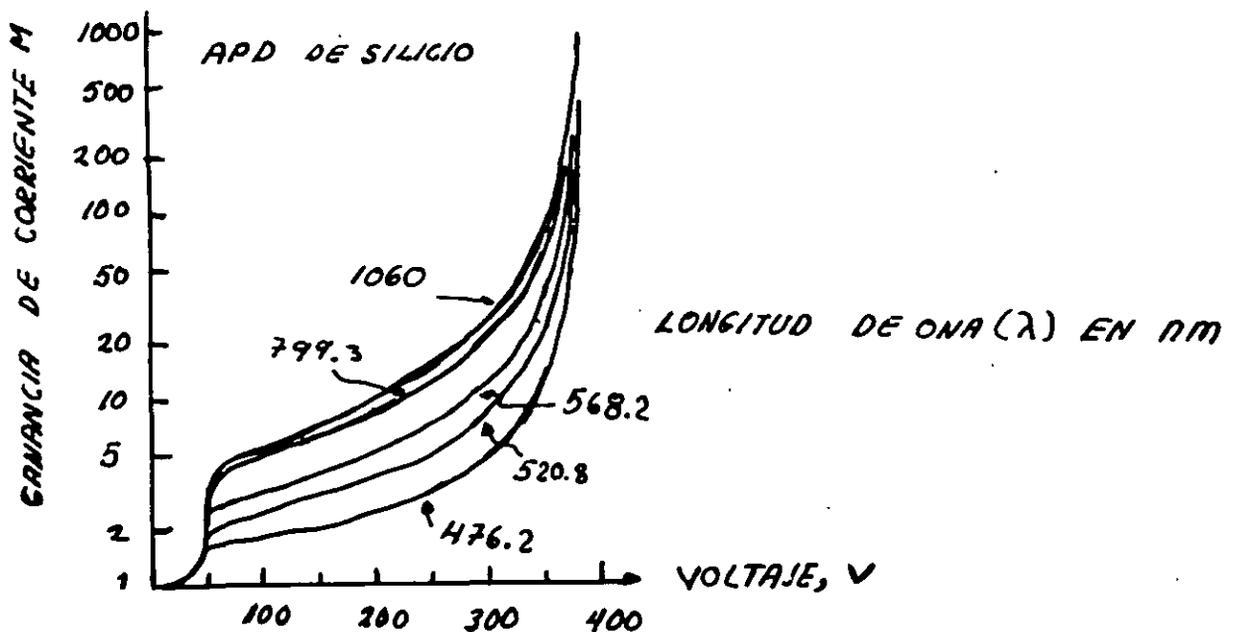
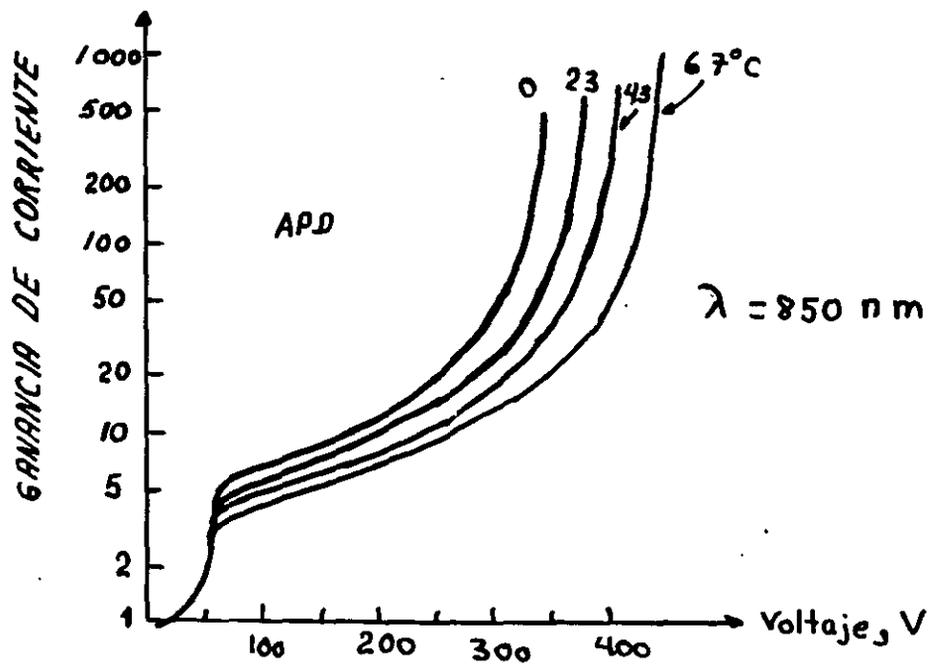


FIG. CARACTERISTICA TIPICA GANANCIA CONTRA VOLTAJE DE APD DE SILICIO A TEMPERATURA AMBIENTE



F16. EJEMPLO QUE MUESTRA LA DEPENDENCIA DE LA GANANCIA DE CORRIENTE DE FOTODIODOS DE AVALANDE DE SILICIO COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA.

COMPARACION:

PIN:

APD:

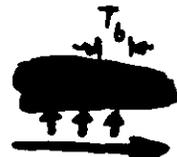
PIN-FET

PULSOS ELECTRICOS DE ENTRADA



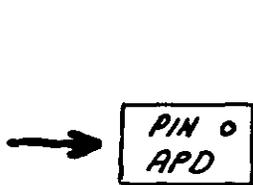
TRANSMISOR

PULSOS OPTICOS



FIBRA OPTICA

PULSOS OPTICOS ATENUADOS Y DISTORSIONADOS



CORRIENTE ELECTRICA QUE CONTIENE EL RUIDO DEL FOTODETECTOR



AMPLIFICADOR Y FILTRO



PULSOS DE VOLTAJE MAS RUIDO DEL AMPLIFICADOR



PULSOS REGENERADOS DE VOLTAJE

CIRCUITO DE DECISION Y REGENERADOR DE PULSOS

EQUIPO PROCESADOR DE SEÑALES

FIG. TRAYECTORIA DE LA SEÑAL A TRAVES DE UN SISTEMA OPTICO DE COMUNICACIONES DE SEÑALES

# FUENTES DE ERROR

LOS ERRORES EN EL MECANISMO DE DETECCION PROVIENEN DE VARIOS RUIDOS Y DISTURBIOS

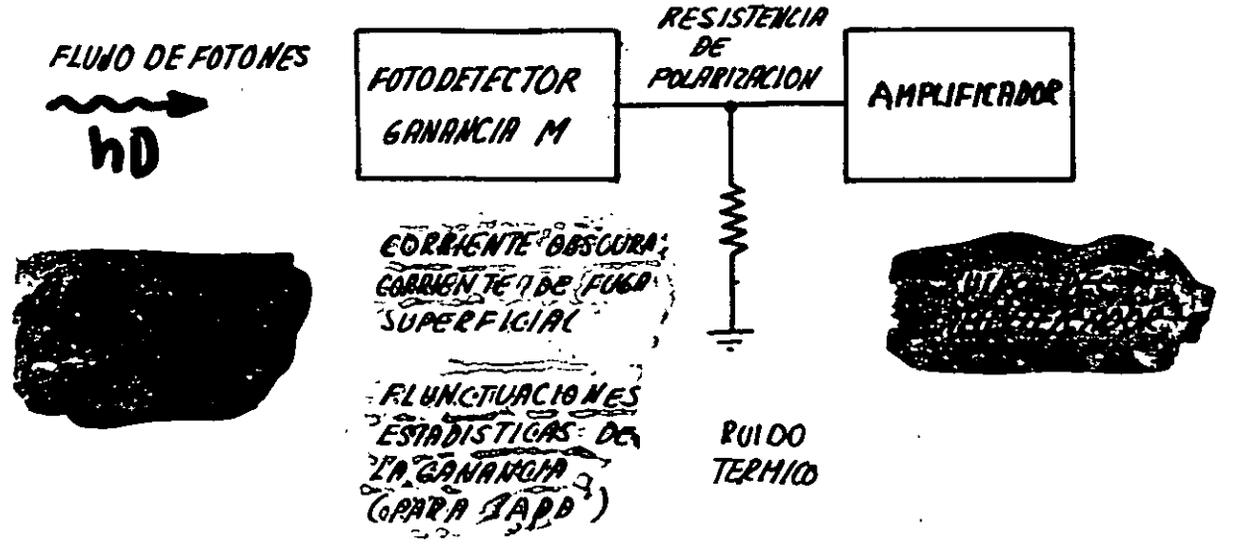
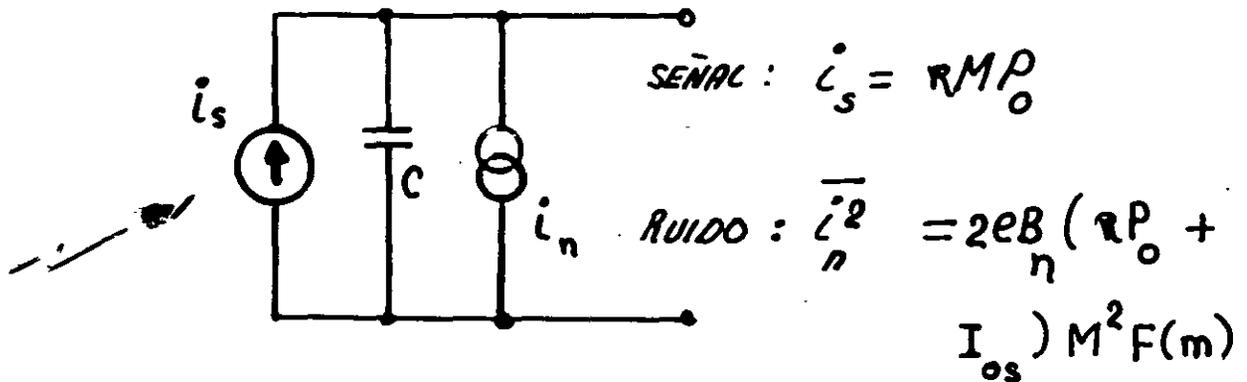


FIG. FUENTES DE RUIDO Y DISTURBIOS EN LA DETECCION DEL PULSO OPTICO

CIRCUITO EQUIVALENTE DE FOTODETECTORES  
DE AVALANCHA



MODELO ELECTRICO DE FOTODETECTORES

$R \rightarrow$  RESPONSABILIDAD PRIMARIA

$M \rightarrow$  FACTOR DE MULTIPLICACION;  $M=1$  PARA PIN

$P_0 \rightarrow$  POTENCIA OPTICA (SEÑAL Y POLARIZACION)

$B_n \rightarrow$  ANCHO DE BANDA DE RUIDO

$I_{os} \rightarrow$  CORRIENTE DE OSCURIDAD (SIN MULTIPLICACION)

$F(M) \rightarrow$  FACTOR DE RUIDO DE EXCESO ( $F(M)=1$   
PARA DIODOS PIN)

FIG. AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA

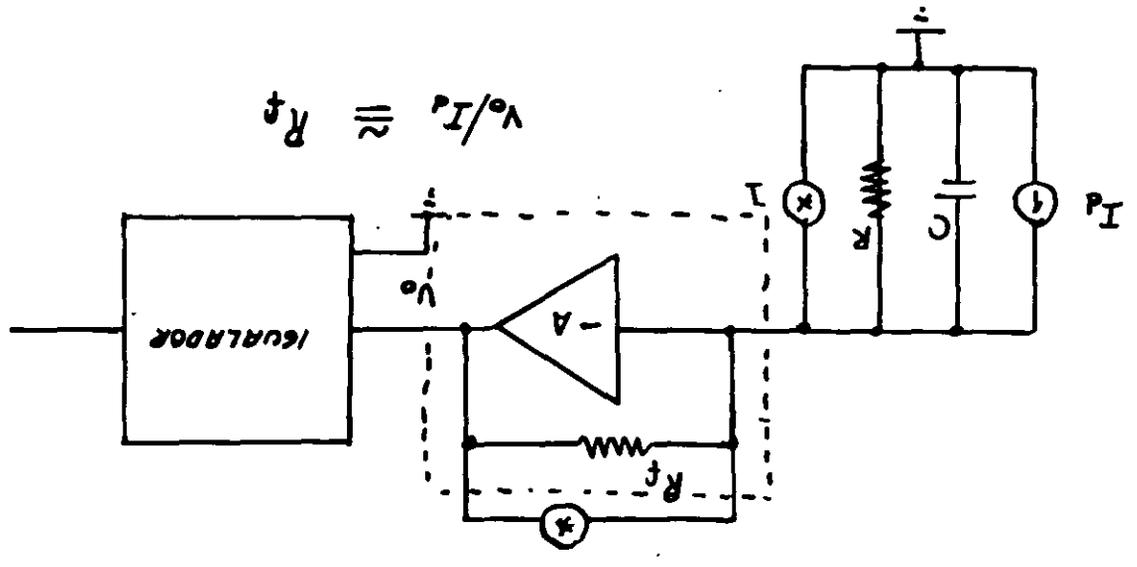
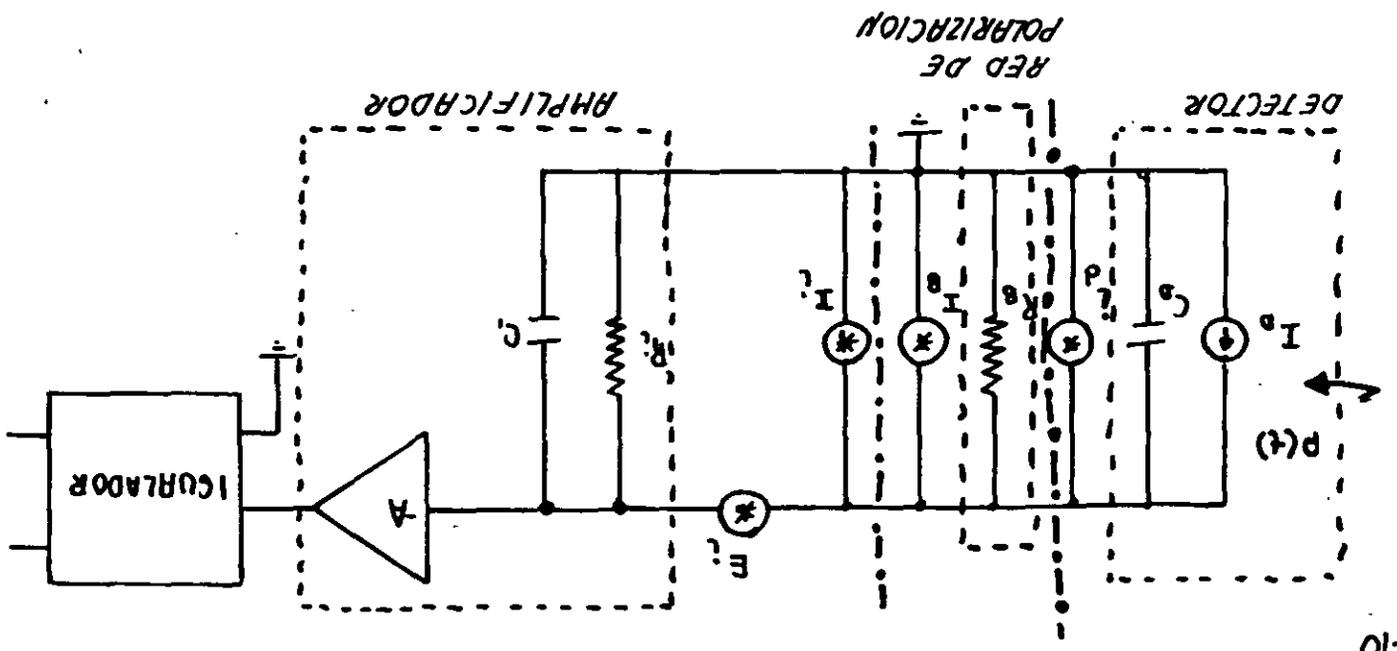
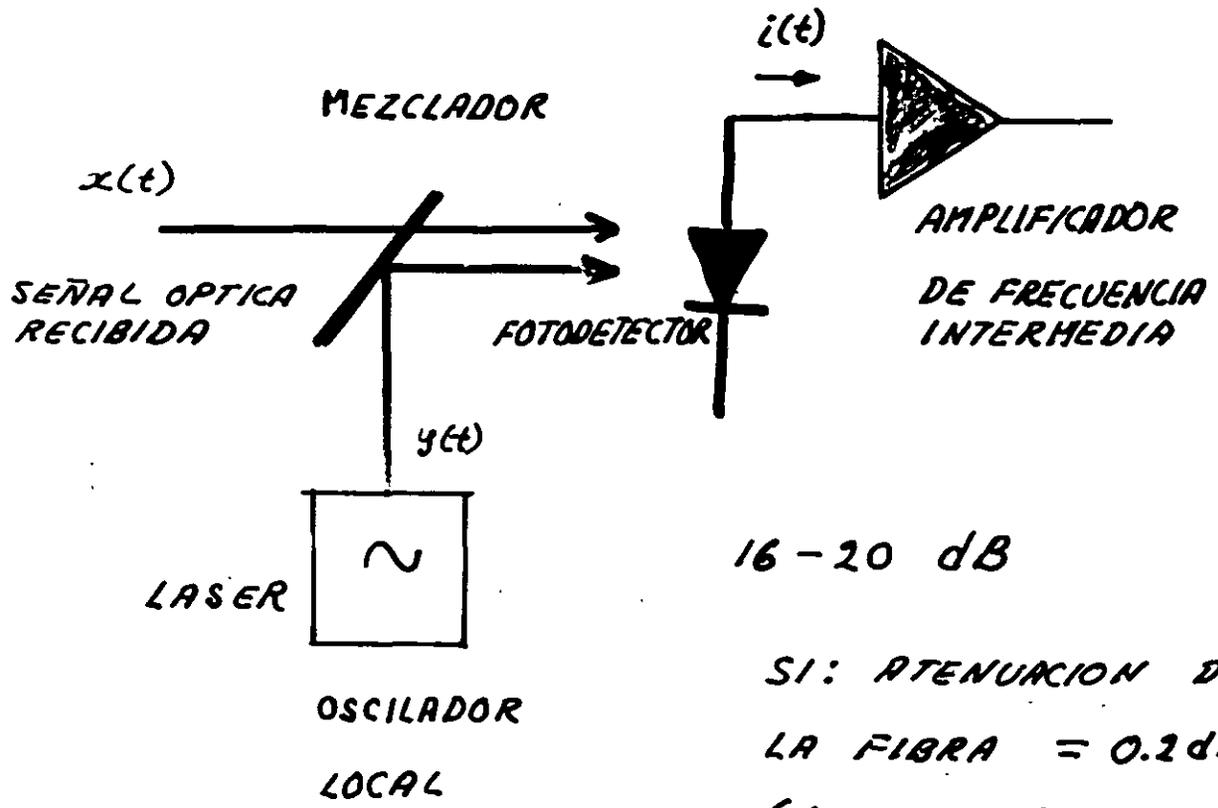


FIG. AMPLIFICADOR OPTICO DE IMPEDANCIA DE ENTRADA GRANDE



# RECEPCION COHERENTE



16-20 dB

SI: ATENUACION DE LA FIBRA = 0.2dB (FIBRA MONOMODO TIPICA)

ΔL - 80 - 100 KM.

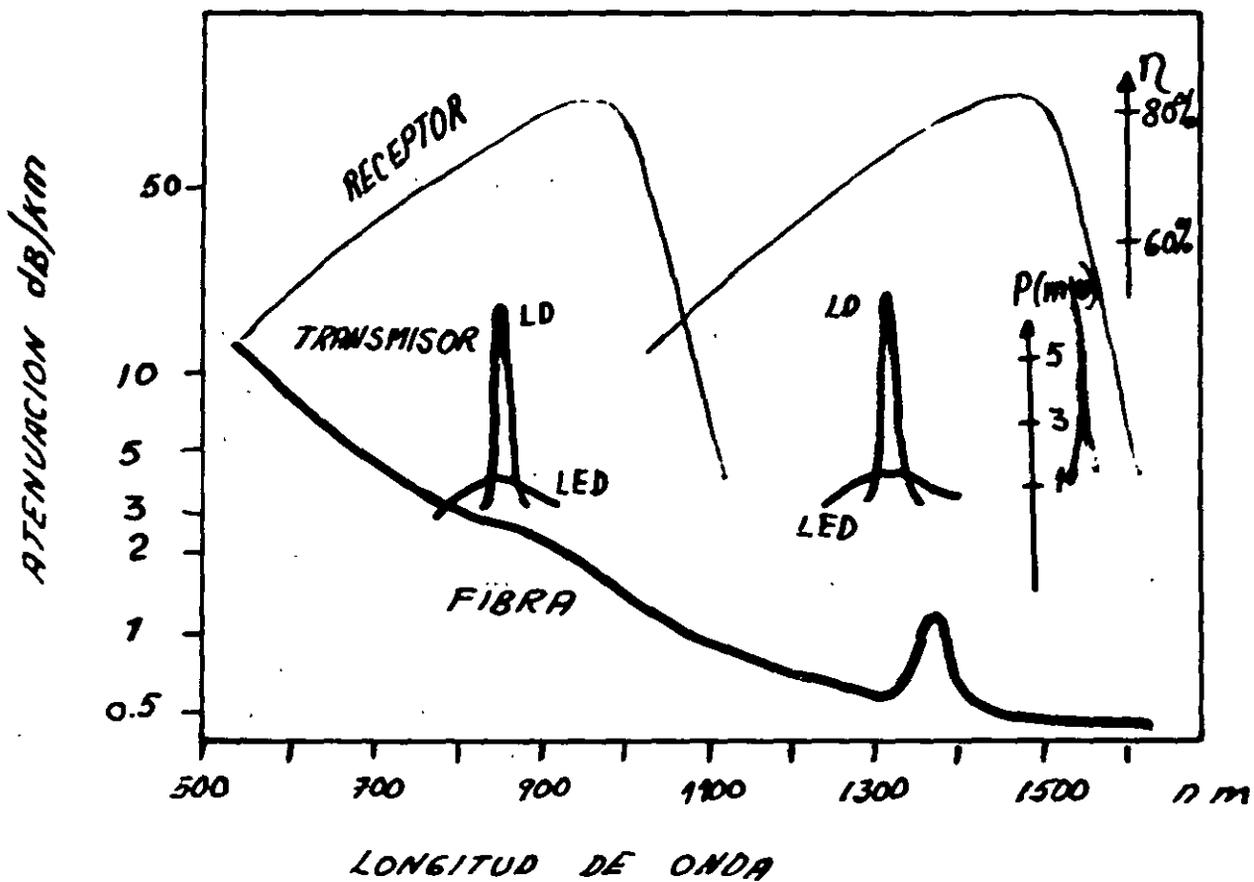


FIG COMPONENTES PARA SISTEMAS OPTICOS DE COMUNICACIONES



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**SENSORES DE FIBRA ÓPTICA**

**CONFERENCISTA  
ING. SILVIA BARRIOS VELÁZQUEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

# SENSORES VIA FIBRA OPTICA.

Ing. Silvia Barrios Velázquez.

## I INTRODUCCION.

Hasta ahora, la principal aplicación de las fibras ópticas permanece en el área de las telecomunicaciones. Sin embargo, por sus grandes bondades (como gran ancho de banda, peso y tamaño reducidos, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, por mencionar algunas), también se han aplicado a otros campos : el control automático, la instrumentación electrónica y en el campo de los sensores.

De los campos de aplicación mencionados, veremos únicamente el de los sensores vía fibra óptica.

## II DEFINICION

Un sensor es un elemento el cual cambia de algún modo a causa de alteraciones externas; por ejemplo, cambios en el medio ambiente, cambios químicos o cambios dimensionales.

## III REQUISITOS PRELIMINARES PARA LA ELECCION DE UN SENSOR VIA FIBRA OPTICA.

El campo de los sensores ópticos es extremadamente grande y competitivo desde el punto de vista de los tipos de tecnologías que pueden ser seleccionadas para desarrollar un sensor.

Algunos de los criterios de selección de una tecnología específica para el diseño de un sensor vía fibra óptica son:

- a) El sensor debe cumplir con las especificaciones requeridas por el usuario, en cuanto a:
  - sensibilidad.
  - exactitud y.
  - reproducibilidad.
  
- b) Los costos deben ser competitivos para la aplicación específica, con otras tecnologías.

#### IV VENTAJAS DE LOS SENSORES VIA FIBRA OPTICA.

Las ventajas de los sensores vía fibra óptica se las dan precisamente el hecho de utilizar fibra óptica y se enumeran a continuación:

- a) Seguros: No hay riesgos de conducción de voltajes peligrosos ni de que provoquen alguna chispa en ambientes altamente explosivos.
  
- b) Tamaño y peso reducidos: Debido a que algunos de los sensores se construyen directamente sobre la fibra óptica, contaminándola de algún material, esto le proporciona dimensiones pequeñas a los sensores.
  
- c) Inmunidad a la IEM: La inmunidad a las interferencias electromagnéticas de los sensores vía fibra óptica, se deben al hecho de que como la fibra es de cristal, no capta ni radía interferencias. Por lo anterior, los sensores pueden colocarse en ambientes de altos niveles de interferencias EM., por ejemplo, en plantas eléctricas o cerca de transformadores, donde un sensor por cable eléctrico se vería altamente afectado.

#### V DESVENTAJAS DE LOS SENSORES VIA FIBRA OPTICA.

A continuación veremos las desventajas de los sensores vía fibra óptica:

- a) Fragilidad: Debe ponerse un cuidado especial en el empaquetamiento del sensor y sus componentes para asegurar robustés.
  
- b) Componentes ópticos pequeños: Las dimensiones tan pequeñas de las F.O. pueden provocar problemas durante la manipulación del sensor por ejemplo, problemas para alinear los componentes lo que requeriría de técnicas especiales y facilidades para su ensamble y reparación en campo.
  
- c) Costo: Muchos componentes desarrollados para aplicación en las telecomunicaciones, pueden no ser lo óptimo para utilizarse en los sensores vía fibra óptica. Por ejemplo algunas veces es necesario desarrollar fibras ópticas con terminaciones especiales como por ejemplo potosidades especiales.

## VI CLASIFICACION DE LOS SENSORES OPTICOS.

Para clasificar los sensores vía fibra óptica, por conveniencia se ha elegido la división en tres grandes grupos, los cuales se describen a continuación.

Los sensores vía fibra óptica se clasifican como:

- Sensores Extrínsecos,
- Sensores Evanescentes y,
- Sensores Intrínsecos.

### a) SENSORES EXTRINSECOS:

Son aquellos donde la Fibra óptica es utilizada únicamente para transmitir luz hacia y desde el punto o región a ser sensada. La luz es liberada de la fibra óptica y modulada externamente por algún cambio inducido o ambiental.

Ejemplos de los sensores Extrínsecos son los sensores de gas con absorción infrarroja. La mayoría de los primeros sensores disponibles comercialmente fueron de este tipo, donde la fobra óptica sólo se utilizaba como medio de transmisión.

### b) SENSORES EVANECENTES:

Los cuales basan su funcionamiento en las pérdidas que sufre la luz que se lleva através de la fibra debido a factores externos. Los sensores de Gas con Fibra óptica porosa es un ejemplo de estos sensores evanescentes.

### c) SENSORES INTRINSECOS:

En este tipo de sensores la misma fibra óptica sirve como dispositivo sensible a alguna influencia externa. Un ejemplo de estos sensores intrínsecos son los interferómetros ópticos en el dominio del tiempo (OTDR)

En la figura 1 se muestra de manera esquemática los tres grupos de sensores vía fibra óptica.

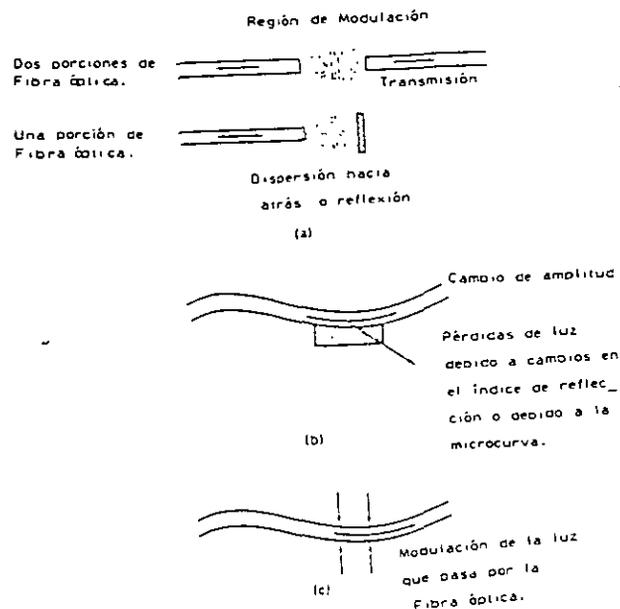


Fig 1 Representación esquemática de los tres grupos de sensores vía fibra óptica: a) Extrínsecos, b) Evanescentes y c) Intrínsecos.

## VII EJEMPLOS DE SENSORES VIA FIBRA OPTICA.

A continuación describiremos el funcionamiento de algunos sensores vía fibra óptica.

### 1.- SENSOR DE GAS CON ABSORCION DE INFRA-ROJO.

Este tipo de sensores estan basados en la absorción por un gas, de la energía óptica en la región del espectro de 0.7 a 20  $\mu\text{m}$  (región de luz infraroja).

Un gas característicamente absorbe luz a ciertas frecuencias que corresponden a su frecuencia de vibración. El sensor vía fibra óptica de gas con absorción de infrarojo se utiliza comúnmente para detectar la presencia de Monóxido de Carbono ( también para detectar Dióxido de Carbono y Metano), el cual tiene un pico de absorción de 4.6  $\mu\text{m}$ .

#### VENTAJAS:

- Alta sensibilidad,
- Respuesta rápida,
- Selectividad,
- Alta inmunidad ante la presencia de otros gases y,
- Bajos costos de mantenimiento

#### DESVENTAJAS

- El laser utilizado debe ser compacto, de alta irradiancia y barato, lo cual no siempre es fácil de conseguir.

Este tipo de sensor se clasifica como Extrínseco.

### 2.- SENSORES DE GAS CON FIBRA ÓPTICA POROSA.

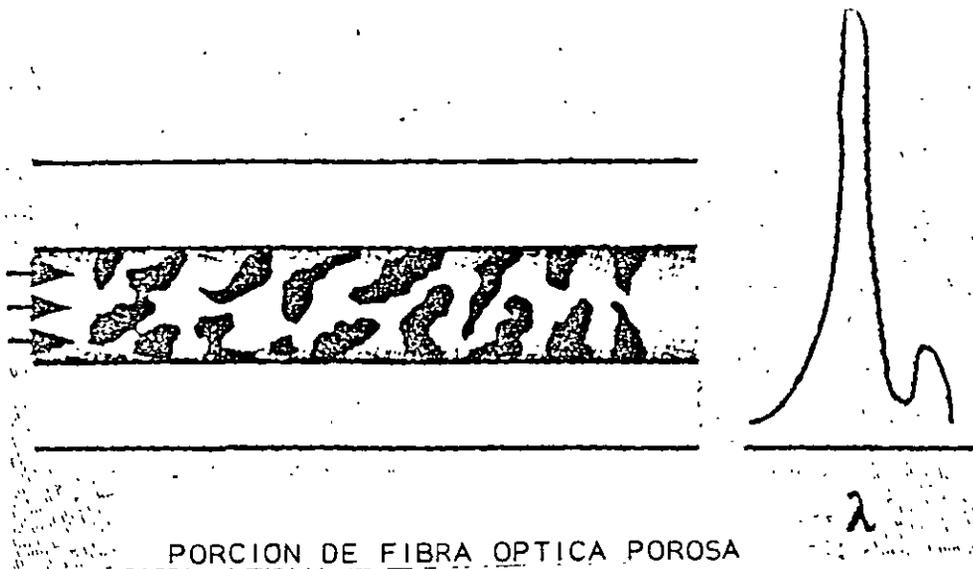
Un sensor experimental de gas, hecho con fibra óptica porosa fué desarrollado para la detección de amonía en bajas concentraciones. La sección porosa de la fibra, se cubre de un indicador químico y el sensor se coloca dentro de una pequeña cámara de gas. En presencia de gas de amonía en la cámara, la absorción de la fibra porosa químicamente tratada, cambia. Por la fibra se ha hecho pasar un láser naranja de HeNe y se monitorea la salida de la luz con un fotodetector. El cambio en la intensidad de la luz detectada es proporcional a la concentración del gas.

En la figura 2 se muestra una sección de fibra óptica porosa y su pico de absorción.

En la figura 3 se muestra una fotografía hecha con ayuda de un microscopio, donde se ven los poros de la fibra óptica porosa utilizada en el desarrollo del sensor descrito.

Este tipo de sensor se utiliza, dependiendo del químico que se impregne en el poro de la fibra:

- Para detección del PH
- Para detección de Monóxido de Carbono,
- Para la detección de Amonía en gas y,
- Para la detección de humedad



PORCIÓN DE FIBRA ÓPTICA POROSA  
 Fig. 2 Sección de Fibra óptica porosa mostrando un pico de absorción.

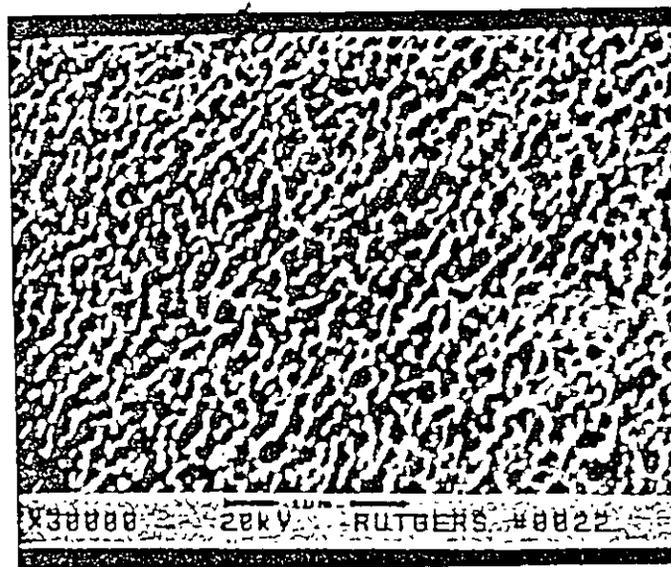


Fig. 3 Imagen de una FO porosa en la cual se observan los poros de 4 a 80 nm los cuales cubren una superficie total de 200 m<sup>2</sup>/g; las pérdidas por dispersión son de 0.7 dB/cm.

Las características de la sección porosa la cual se muestra en la figura 3 son

- La sección porosa es compacta: 1 cm de longitud aproximadamente,
- La sección porosa se recubre con indicadores químicos dependiendo el tipo de gas que se desea sensar.

A continuación veremos el campo de aplicación de los sensores vía fibra óptica.

## VIII APLICACIONES DE LOS SENSORES VIA FIBRA OPTICA.

Los primeros sensores vía fibra óptica fueron desarrollados para cubrir requerimientos de la milicia, donde el costo del dispositivo no se consideraba un factor muy importante. A continuación mostramos algunas de las aplicaciones más importantes de los sensores.

AREA DE APLICACION	COMENTARIOS
MEDICINA	Los sensores desarrollados en esta área son desechables. Consisten en pequeños dispositivos que se insertan en el torrente sanguíneo, para determinar problemas como Cáncer o inactividad de los anticuerpos.
MILICIA	Se han desarrollado muchos sensores en esta área con aplicación en vigilancia y navegación: sensores de campo magnético, giróscopos, acústicos, sensores de fuego, de radiación, etc.
AEROESPACIALES	Sensores para detectar aceite en agua, partículas en los combustibles, sensores de presión. Para las aplicaciones aeroespaciales los sensores deben ser ligeros y resistentes a las vibraciones y a grandes temperaturas.
MARITIMAS	Detección de gas en las plataformas marinas, sensores de fuego, humo, control de niveles de contaminantes, etc. Los sensores en ésta área están fuertemente ligados al desarrollo de los cables los cuales deben ser herméticos y resistentes a la fatiga mecánica.
EMPRESAS DE SERVICIO PUBLICO Y APLICACIONES INDUSTRIALES	En las empresas de servicio las aplicaciones son especializadas: sensores detectores de gas en un punto específico o en un área determinada, detectores de voltaje y corriente y sensores de temperatura. Las aplicaciones industriales de los sensores incluyen: sensores de presión, de flujo, de temperatura, etc. Para aplicaciones industriales los sensores deben ser competitivos en cuanto al costo. Usualmente se requiere multiplexaje y utilización de componentes ópticos estandarizados.

Tabla 1. Aplicaciones de los sensores de fibras ópticas.

## IX CONCLUSIONES.

Las aplicaciones de las fibras ópticas como sensores siguen de cerca los avances del uso de las fibras en las telecomunicaciones. Sin embargo, es probable que la tasa de aceptación sea aún baja, hasta que los sistemas sensores vía fibra óptica sean lo suficientemente robustos y baratos.

Se ha enfatizado la importancia de los aspectos mecánicos y operacionales del sensor en cuanto a su sensibilidad y además, que las pruebas de operación de los sensores en condiciones controladas de laboratorio no son relevantes si no más bien las pruebas que importan son las operacionales en el campo.

Los ingenieros primero debe distinguir las técnicas que proveen ventajas sobre otras tecnologías y que permitan la operación de los dispositivos en medios adversos y que puedan permanecer robustos y cumplir con los requisitos en cuanto a mantenimiento sencillo.

Se ha mostrado que el campo de los sensores de FO cubren un rango muy amplio variando desde dispositivos muy caros con aplicaciones militares que a menudo requieren componentes específicos y costosos, hasta aplicaciones médicas y procesos de control más simples donde el bajo costo, la seguridad y la funcionalidad son las consideraciones primordiales para el desarrollo de los mismos.

## SENSOR DE VOLTAJE BASADO EN EL EFECTO POCKELS.

### Medición Tradicional de Voltaje.

En plantas eléctricas, las mediciones de voltaje y corriente se requieren para controlar, supervisar y registrar la generación, transmisión, distribución y venta de energía; lo que implica la necesidad de técnicas de medición seguras, confiables y económicamente adecuadas.

La mayor parte de las mediciones se basan en la utilización de transformadores de voltaje (TV) y de corriente (TC). Esta tecnología se ha desarrollado durante 75 años, aproximadamente, y alcanza hoy un nivel adecuado para la tarea requerida.

Sin embargo, a medida que los sistemas de potencia se extienden y se interconectan de manera completa y que los voltajes se incrementan, esta tecnología convencional empieza a presentar limitaciones, dada la necesidad de más exactitud bajo diferentes condiciones de operación y de un mayor número de puntos de medición. En las industrias eléctricas del mundo, esto ha motivado la búsqueda de tecnologías alternativas para la medición, esto, combinado con el acelerado desarrollo del campo de las fibras ópticas ha enfocado la atención sobre los sensores ópticos aplicados a esta función.

El campo de los sensores ópticos presenta gran interés dadas las características de las fibras, los emisores, los detectores y los transductores ópticos relacionados con el aislamiento eléctrico, la inmunidad a interferencias, la velocidad de respuesta, el intervalo dinámico, el tamaño y peso reducidos. Se han investigado y desarrollado sensores ópticos para la transducción de variables físicas en el área de mecánica, médica, navegación, varios de los cuales han alcanzado etapas industrial y comercial.

Nosotros nos enfocaremos en el funcionamiento del sensor de voltaje que hace uso del efecto-electroóptico en cristales.

El diagrama a bloques del sensor desarrollado es el siguiente:  
Fig. 1.

Los lentes (Fig. 2), al inicio y al final del sensor se utilizan para colimar el haz de luz (y enfocarlo) que sale de la fibra depolarizado.

#### POLARIZACION.

La luz (Fig. 3) como una onda electromagnética se caracteriza por una combinación de campos eléctrico y magnético, que varían en el tiempo y se propagan a través del espacio. Los campos eléctrico y magnético vibran perpendiculares uno con respecto al otro y perpendicularmente a la dirección de propagación. Si el vector de campo eléctrico de una onda electromagnética que se propaga en el espacio libre vibra en un plano específico, se dice que la onda está polarizada en el plano. Pero si el haz luz comprende muchas ondas individuales y en general los planos de vibración de sus campos eléctricos son aleatoriamente orientados, se dice que esta luz es depolarizada.

#### BIRREFRINGENCIA ( FIG. 4 ).

Muchos cristales son eléctricamente anisotrópicos, es decir sus propiedades ópticas no son las mismas en todas las direcciones de una muestra dada; la anisotropía está poco relacionada con la estructura del enrejado cristalino. Esto significa que la polarización  $P$  producida por un campo eléctrico  $E$  no se puede representar por un simple escalar múltiplo del campo aplicado, sino que varía de manera que depende de la orientación del campo aplicado con respecto al enrejado cristalino. Una consecuencia de esto es que la rapidez de propagación de un haz de luz en tal cristal, depende de

la dirección de propagación y polarización de la luz. En otras palabras, el índice de refracción varía con la dirección del cristal. De esto podemos concluir que hay dos posibles valores de velocidad de fase para una dirección dada de propagación. Este tipo de cristales son llamados doblemente refractivos o birrefringentes.

#### EL FENOMENO ELECTROOPTICO (FIG. 5)

Pero nuestro cristal no presenta este fenómeno de manera natural, así que pasaremos a definir el efecto electroóptico. Este efecto también llamado efecto pockels o efecto lineal enuncia que "Cuando se aplica un campo eléctrico a ciertos materiales se induce un cambio de índice de refracción  $\Delta n$  que es directamente proporcional al campo eléctrico aplicado".

El cambio en el índice, como función del campo eléctrico puede ser representado por la ecuación:  $\Delta n = r \epsilon$  donde  $r$  se une a la llamada coeficiente lineal Electro-óptico y  $\epsilon$  es el campo eléctrico aplicado.

El resultado de este efecto lineal es introducir nuevos ejes ópticos a los ejes naturales del cristal. En el efecto Pockels las direcciones privilegiadas son perpendiculares al campo eléctrico aplicado. Así un cristal electro-óptico exhibirá birrefringencia en el plano (X Y), si el campo eléctrico se aplica en la dirección Z.

La luz emergente será luz polarizada elípticamente. Como ya se dijo la luz polarizada en el plano o linealmente polarizada es aquella en el que todo el tren de ondas que comprene el haz tienen su vector de campo eléctrico situado en el mismo plano. Para fines prácticos un haz puede considerarse como dos ondas linealmente polarizadas con sus planos de polarización perpendiculares uno a otro y están fuera de fase.

## LUZ ELIPTICA (FIG. 6)

Consideremos ahora el caso especial donde las amplitudes de las ondas son diferentes y tienen una diferencia de fase de  $\pi/2$ .

Si estas ondas se propagan en dirección Z podemos escribir las componentes de campo eléctrico como  $E_x = iE_0 \cos \psi$  y

$$E_y = j E'_0 \text{ sen } \psi.$$

El campo eléctrico total es la suma de los dos componentes:

$$E = E_x + E_y \quad \text{y,} \quad \psi = Kz - wt$$

donde K es la constante de propagación en dirección z, w es la frecuencia angular y t es el tiempo. Por lo tanto:

$$E = i E_0 \cos (Kz-wt) + j E'_0 \text{ sen } (Kz - wt).$$

La resultante de esta última ecuación puede ser interpretada como una onda individual, en la cual el vector de campo eléctrico en un punto dado en el espacio, difieren en amplitud y rotan con una frecuencia angular w, tal onda se dice que es elípticamente polarizada.

## LA PLACA DE RETARDO (FIG. 7)

Los retardadores son un tipo de elemento óptico que se utiliza para cambiar el estado de polarización de la luz incidente sobre él. Uno de los dos estados coherentes de la luz es retrasado en fase, de alguna manera, con respecto al otro. La luz que emerge del retardador tiene una diferencia de fase relativa diferente a la que tenía inicialmente y, por lo tanto un estado de polarización diferente. Como sabemos cuando un haz de luz monocromático incide sobre un cristal uniaxial generalmente dividido en dos emergiendo como un haz ordinario y otro extraordinario. Después de atravesar el retardador de espesor de la onda electromagnética será la superposición de las ondas C y O, con una diferencia de fase  $\Delta\psi$  la cual:

$$\Delta\Psi = \frac{2\Pi}{\lambda_o} d (|N_o - N_e|)$$

La lámina de  $1/4$  de longitud de onda es aquella que introduce un retardo de  $\Pi/2$  entre las componentes o y e. Este tipo de placas de método se fabrican de mica, cuarzo y plástico polimérico.

FIGURA 1

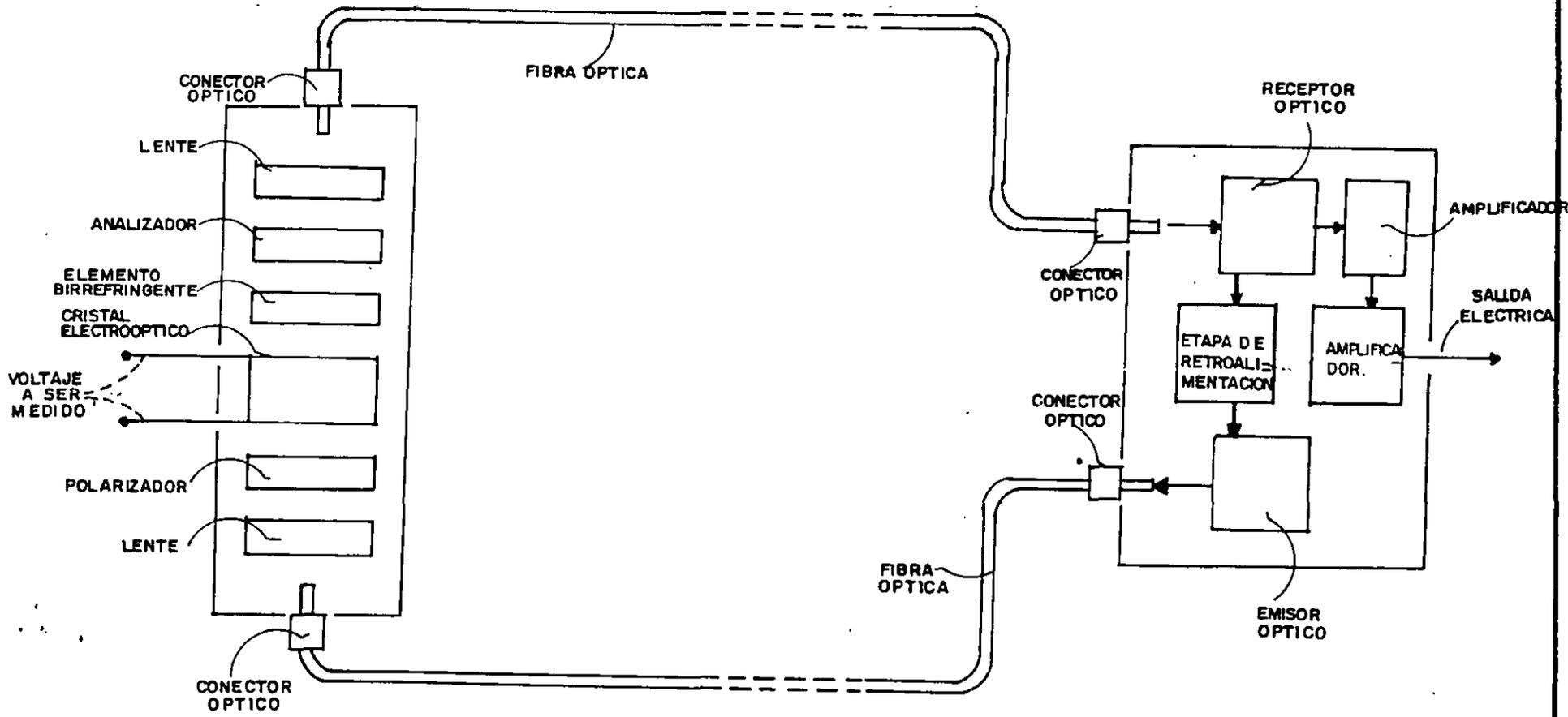


FIG. 4.1 DIAGRAMA A BLOQUES DEL SENSOR DE VOLTAJE.

## DESCRIPCION DEL SENSOR DE VOLTAJE.

La figura 4.1 muestra el diagrama a bloques del sensor de voltaje. Un diodo emisor de luz infrarroja de alta irradiancia operando en  $0.860 \mu\text{m}$  y un fotodiodo tipo PIN se utilizan como fuente de luz y detector, respectivamente.

Con la utilización de un amplificador de bajo ruido integrado el diseño del receptor se facilitó en gran manera.

La confiabilidad de los leds ha sido demostrada por su utilización en muchos sistemas de comunicación por fibra óptica. El fotodiodo convierte la señal óptica a una señal eléctrica idéntica.

Al aplicar un voltaje al cristal modulador, la luz que atraviesa el cristal sigue las variaciones de dicho voltaje, lo que se traduce en una señal de c.a. montada en un nivel de c.d. Así la transmitancia está dada por la ecuación 2.32:

$$I = \frac{I_0}{2} \left( 1 + \text{Sen } \pi \frac{V}{V_0} \right)$$

donde  $I$  es la intensidad de la señal modulada (a la salida del esquema polarimétrico),  $I_0$  es la intensidad de luz que entra al sensor,  $V$  es el voltaje aplicado y  $V_0$  es el voltaje necesario para transmisión máxima.

La señal óptica de c.d. está dada por:

$$P_{cd} = \frac{1}{2} I_0$$

mientras que la señal de c.a. es:

$$P_{ca} = \frac{1}{2} I_0 \text{ Sen } \pi \frac{V}{V_0}$$

Detectando la señal óptica de c.a. que va 'montada' en la señal de c.d., podemos obtener el voltaje aplicado al cristal.

Se utiliza una fibra óptica que tiene 50  $\mu\text{m}$  de diámetro en el núcleo, 125  $\mu\text{m}$  de diámetro del revestimiento y 0.25 de apertura numérica.

La potencia acoplada en el sistema es 251  $\mu\text{w}$ , y la potencia óptica promedio recibida es de 15.8  $\mu\text{w}$ ; de éste modo, las pérdidas de inserción son 12dB. Algunas de las pérdidas en el sistema son inevitables, como por ejemplo, las debidas a la presencia en el esquema polarimétrico del polarizador y de la placa de retardo que provocan pérdidas de 6dB; las demás pérdidas se deben a el resto de los componentes ópticos y a desalineamientos en el esquema.

La figura 4.2 muestra el arreglo del modulador electroóptico, el cuál consiste de un polarizador, el cristal KD\*P, una placa de retardo de  $\lambda/4$ , un analizador (en cuadratura con el polarizador) y dos lentes. La dirección del campo eléctrico aplicado al cristal es la misma que tiene el haz de luz (en dirección de z). La luz que sale de la fibra óptica es colimada por el primer lente y polarizada linealmente por el polarizador. En presencia del campo eléctrico aplicado, la luz linealmente polarizada es cambiada a luz elípticamente polarizada a su paso por el cristal electroóptico. Esta luz con polarización elíptica pasa por la placa de retardo y por último, es introducida nuevamente a la fibra por el segundo lente; de modo que la luz está ahora modulada electroópticamente. El índice de modulación es equivalente al voltaje de corriente alterna aplicado

al cristal. Esto es; el voltaje aplicado al sensor puede ser medido detectando el índice de modulación de la señal óptica. El índice de modulación (m) es la relación entre la potencia de la señal de corriente alterna dividida sobre la potencia de la señal de corriente directa:

$$m = \frac{P_{ca}}{P_{cd}} \quad 4.1$$

En ambos lados del cristal  $K^*DP$  se deposita por evaporación una película conductora semitransparente de óxido de Indio y el cable es colocado en contacto con dicha capa.

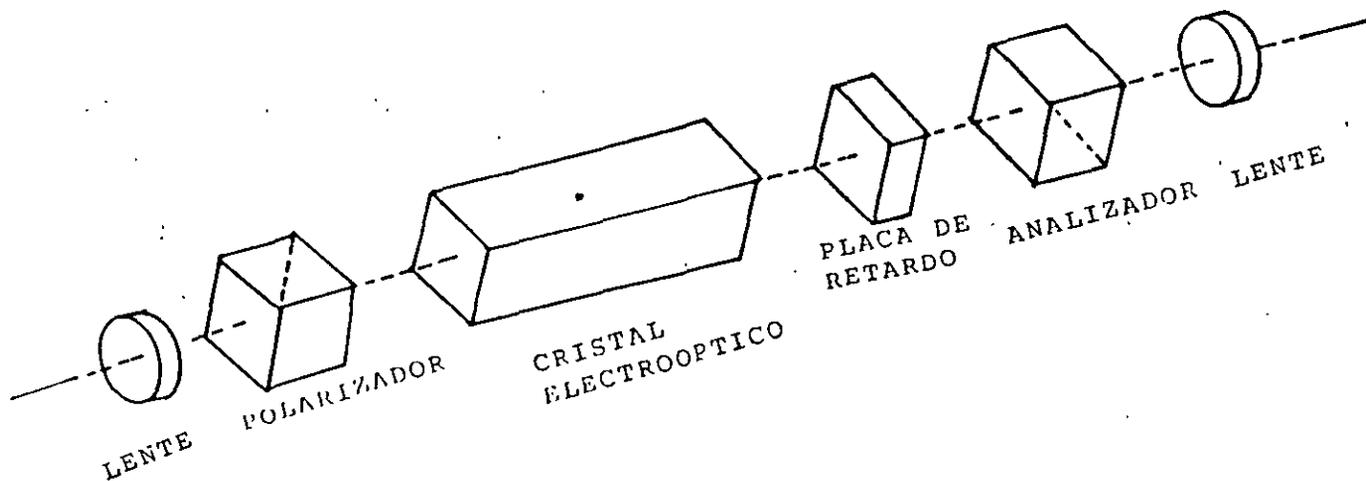


fig. 4.2 Los componentes del modulador electroóptico.

El tamaño del esquema polarimétrico mostrado en la figura 4.2 es de 20 x 16 x 5.5 cm, debido a que las bases donde se colocaron los componentes ópticos son bastante voluminosas, por ser componentes para laboratorio. (las bases lo mismo que los conectores de las fibras, deben ser de preferencia de plástico para conservar el alto aislamiento del sensor). El montaje experimental se realizó sobre una mesa óptica 'Melles Griot'.

#### 4.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL ESQUEMA POLARIMETRICO.

En la mayoría de los casos, un sensor se utiliza para determinar el valor instantáneo de una variable (voltaje, corriente, presión, etc.), por ello, la función de transferencia deseable es una función lineal:

$$R(x) = Kx \quad 4.2$$

donde:

x es la variable a medir.

R(x) es la salida del sensor y,

K es una constante.

En muchos casos, especialmente en la medición de variables de doble polaridad, la naturaleza anti-simétrica de la forma de onda es importante. Desafortunadamente, en el campo de la óptica, raramente es posible obtener funciones lineales.

[1] En todos los casos, la salida de un sensor óptico está relacionada a la variable a medir por una función de la forma:

$$R(x) = A \text{ Sen}^2 \left[ \phi + \frac{x}{x_0} \right] \quad 4.2$$

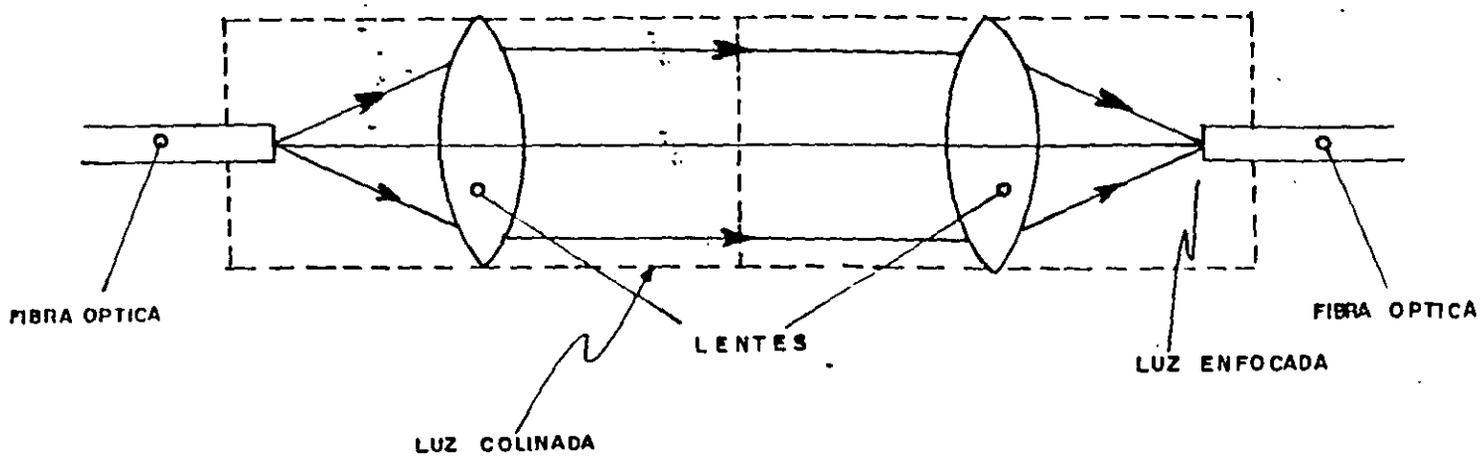


FIG. 2 ARREGLO DE LENTES.

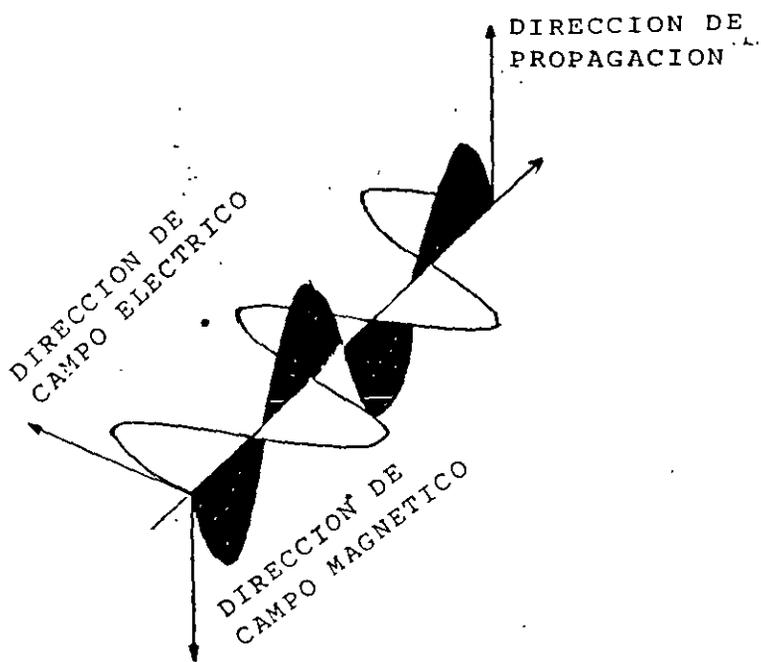


FIG. 3 UNA ONDA ELECTROMAGNETICA.

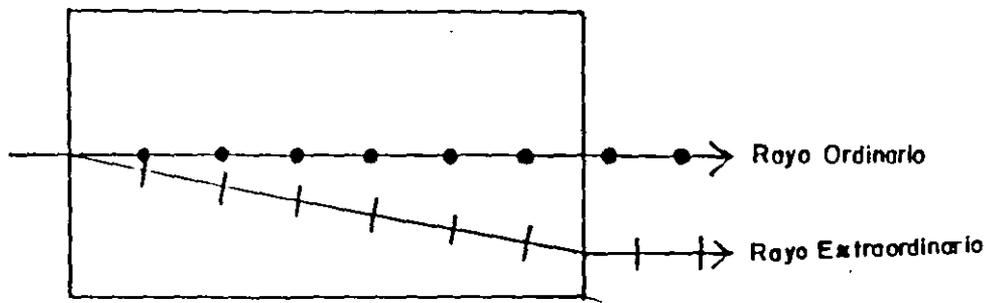


FIG. 4 CRISTAL EXHIBIENDO BIRREFRINGENCIA.

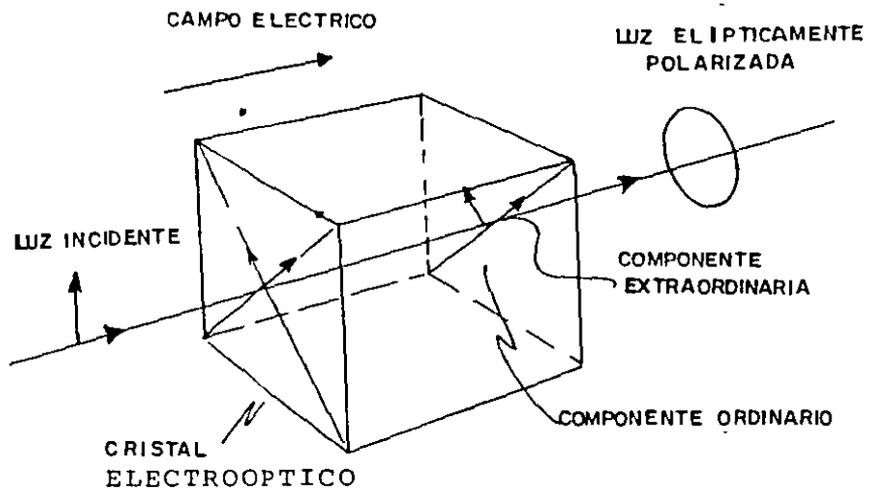


FIG. 5 EL FENOMENO ELECTROOPTICO.

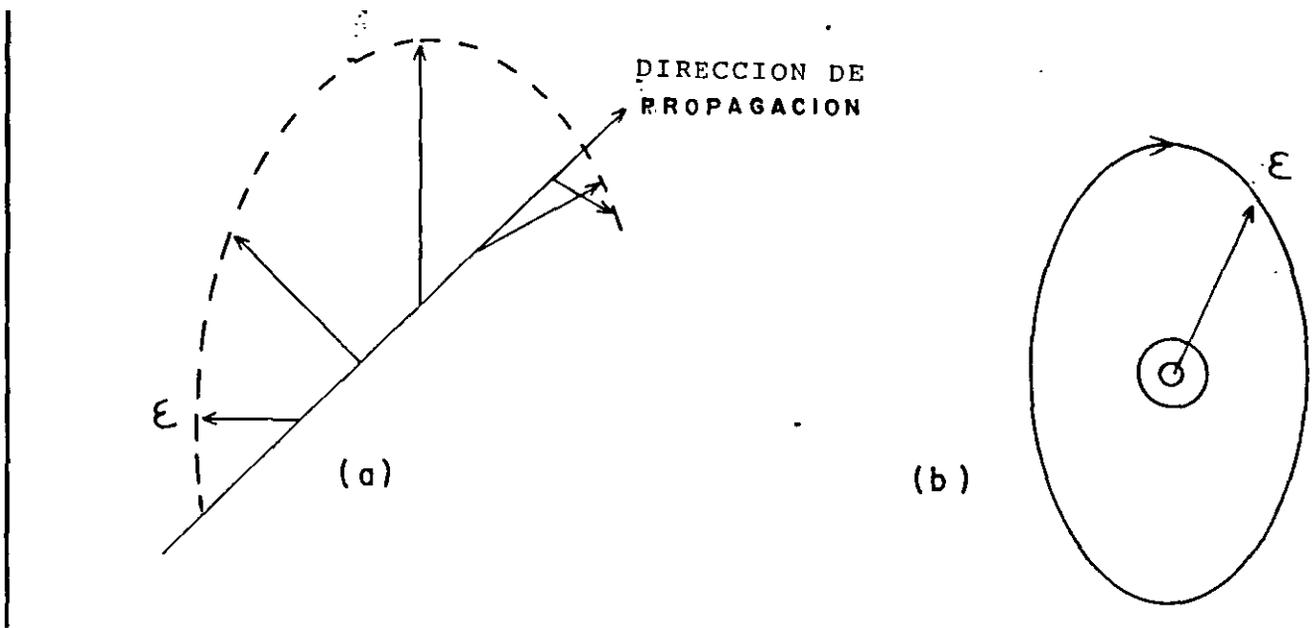


FIG. 6 LUZ ELIPTICAMENTE POLARIZADA.  
 a) EN UN PUNTO EN EL TIEMPO.  
 b) EN UN LUGAR EN EL ESPACIO.

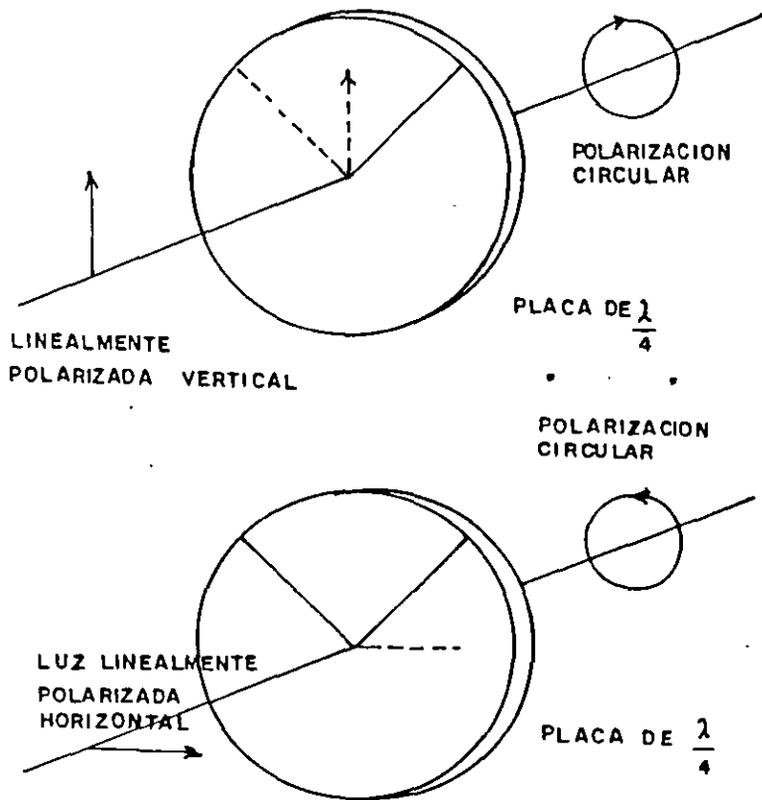
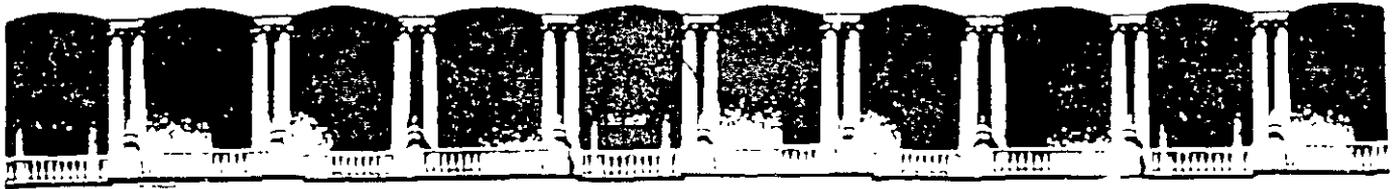


FIG. 7 PLACA DE UN CUARTO DE LONGITUD DE ONDA.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

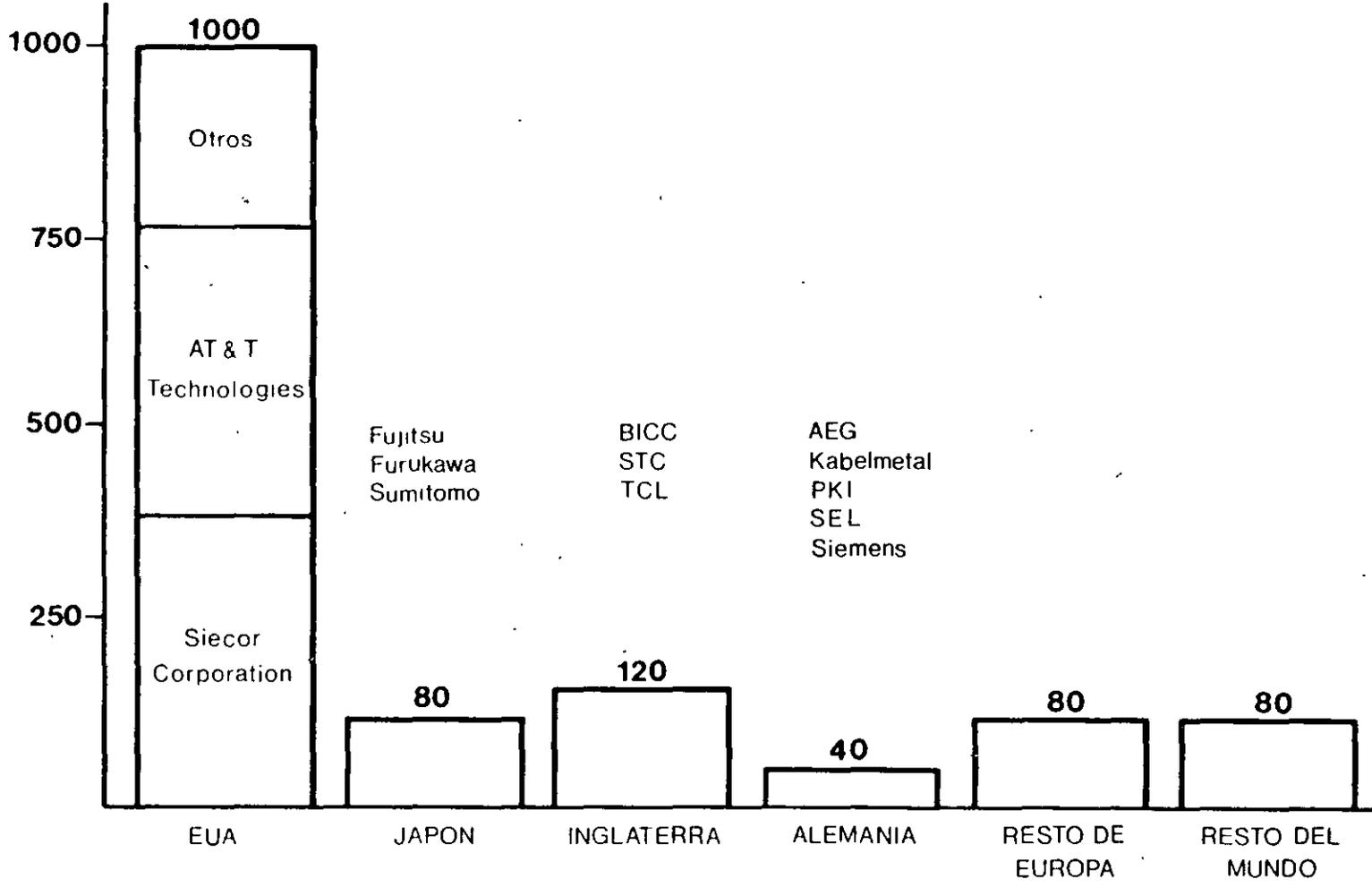
**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

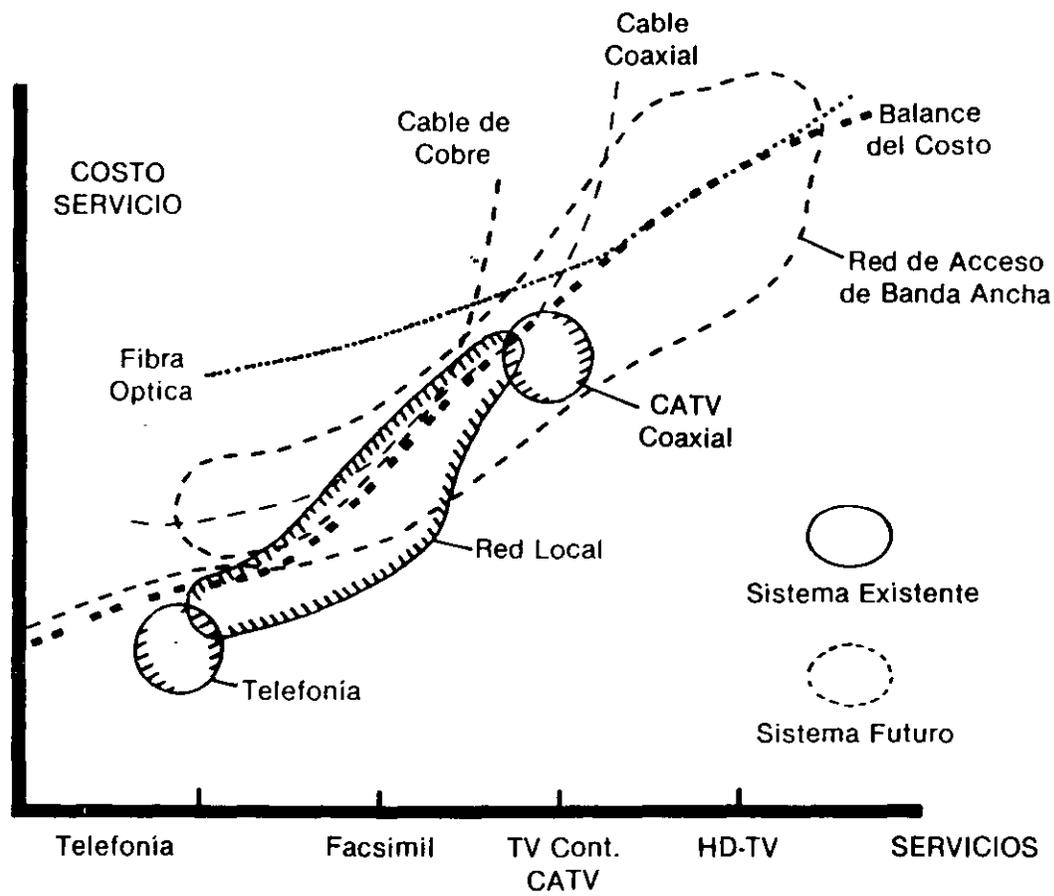
**TEMA**

**REDES DE FIBRAS ÓPTICAS**

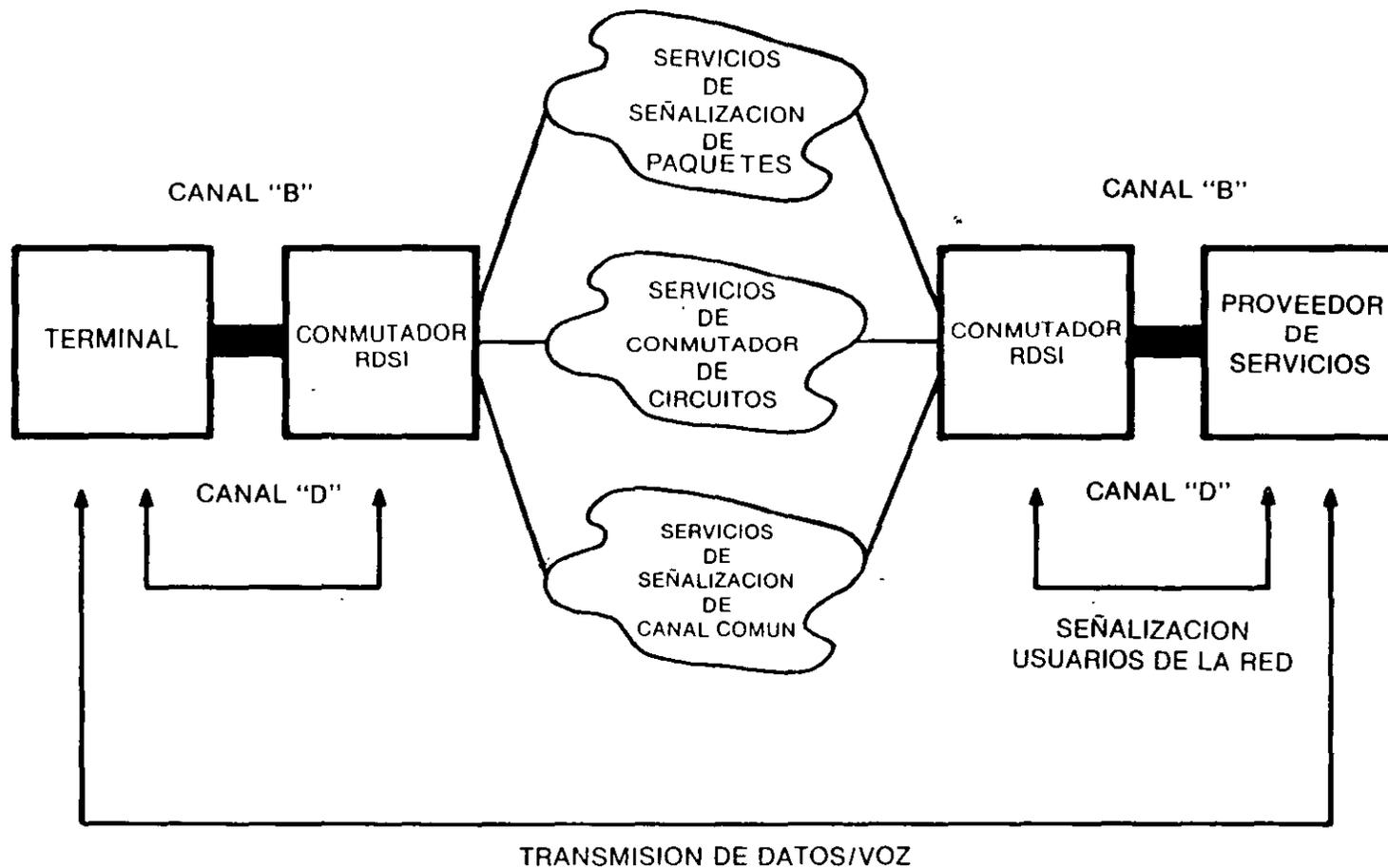
**CONFERENCISTA  
ING. GERARDO CHÁVEZ DÍAZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

FIBRAS EN CABLE  
(Miles de Km)

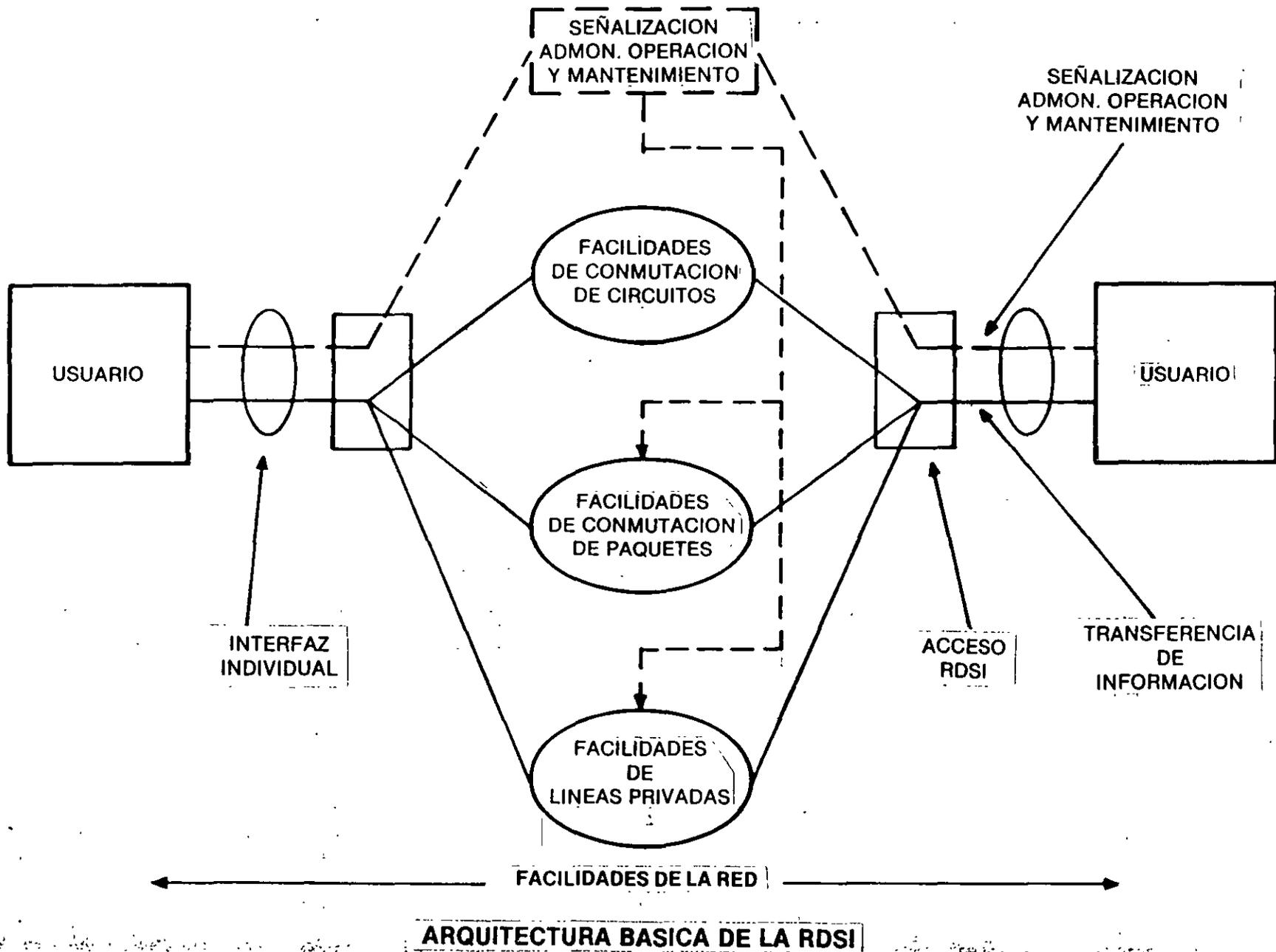


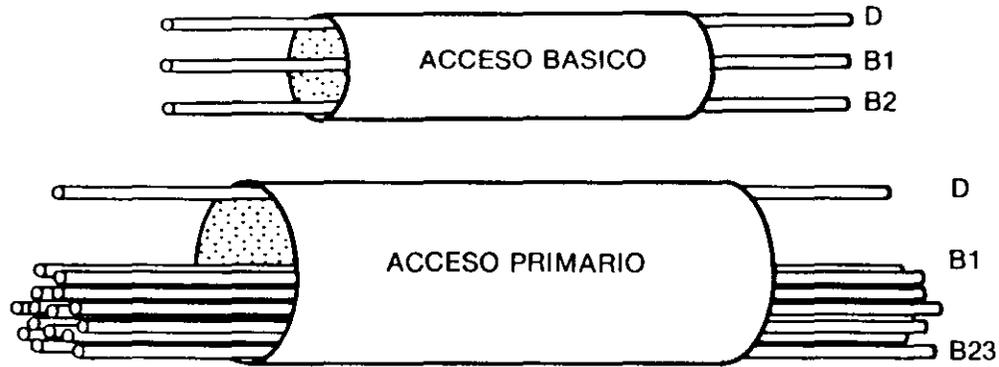


MAPA COSTO-SERVICIO



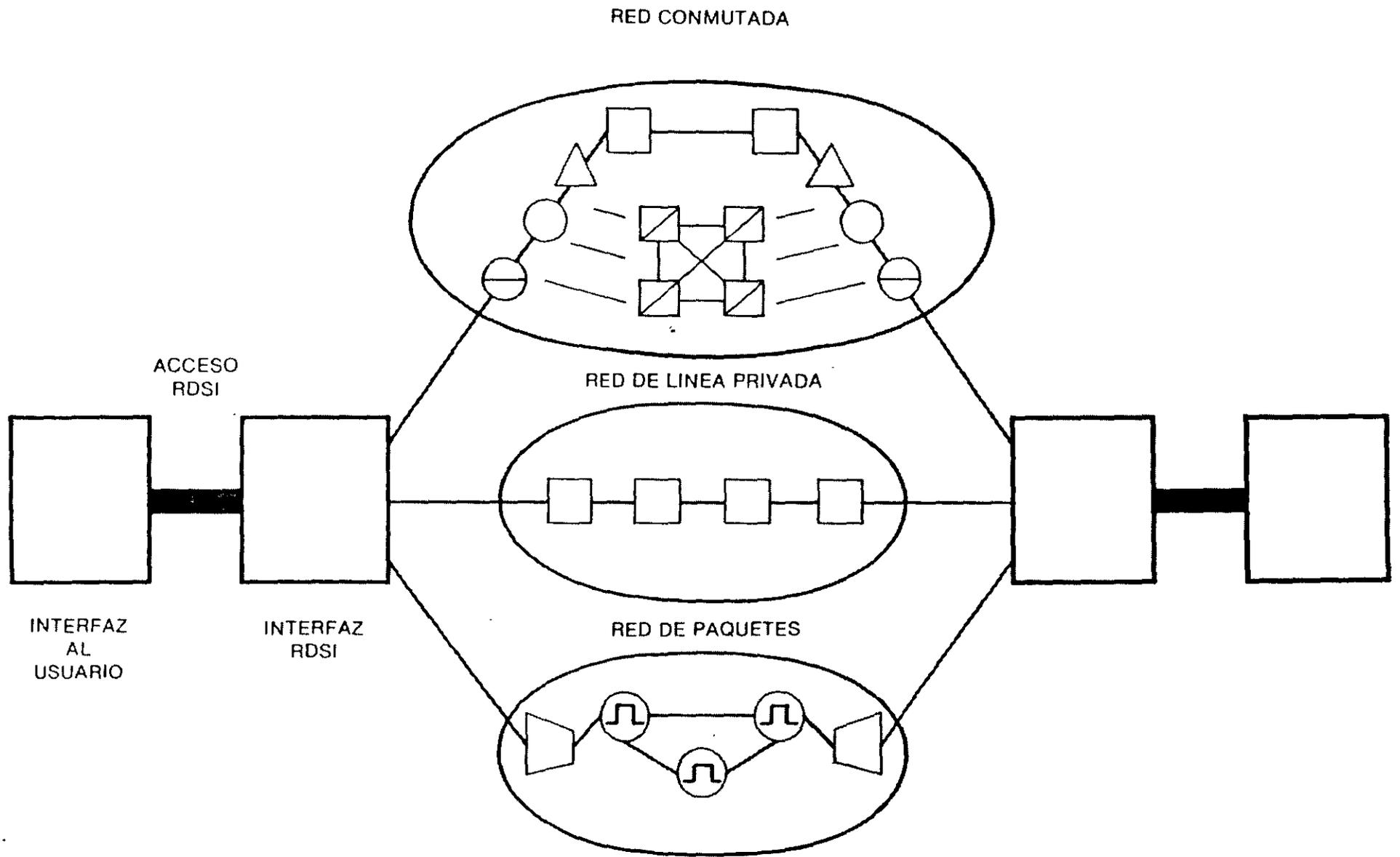
**INTERFACES DE LA RDSI CON LOS DIVERSOS USUARIOS DE LA RED**



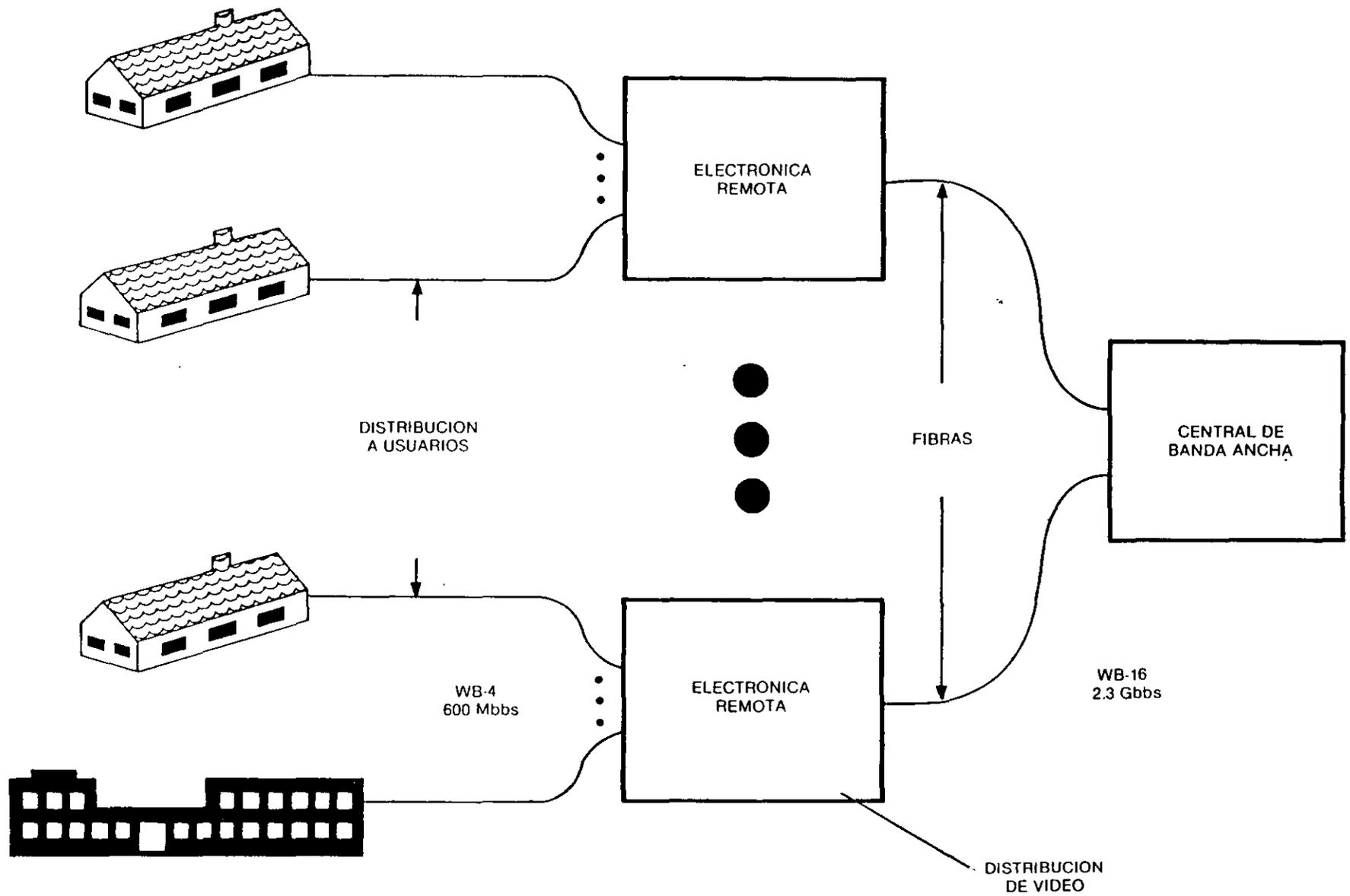


Canal "D": Señalización + Paquete de Datos  
Canal "B": Acceso Digital a 64 kb/s

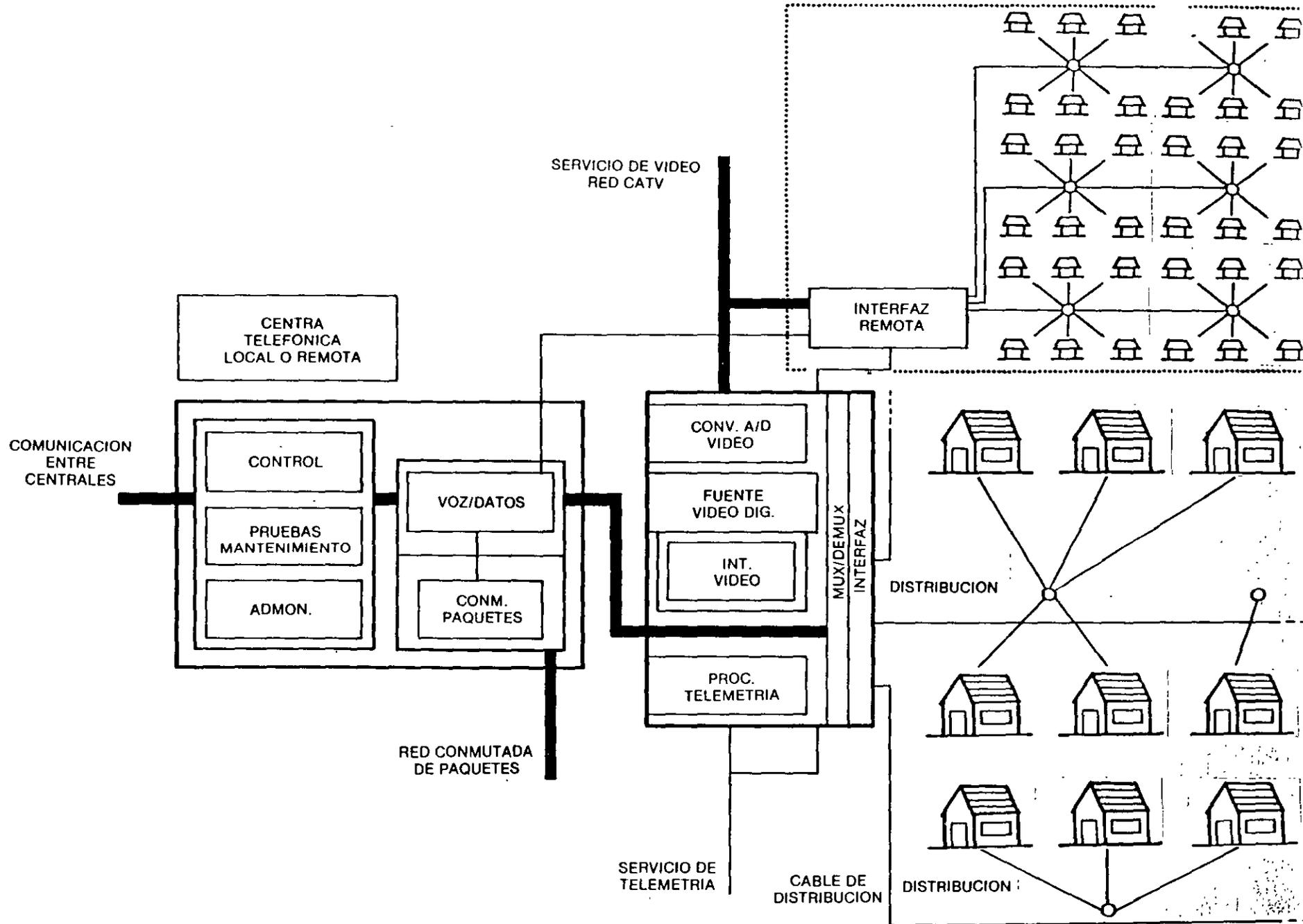
### INTERFACES PARA RDSI: ACCESO BASICO Y ACCESO PRIMARIO



**CONCEPTO DE RED DIGITAL DE SERVICIOS INTEGRADOS (RDSI)**



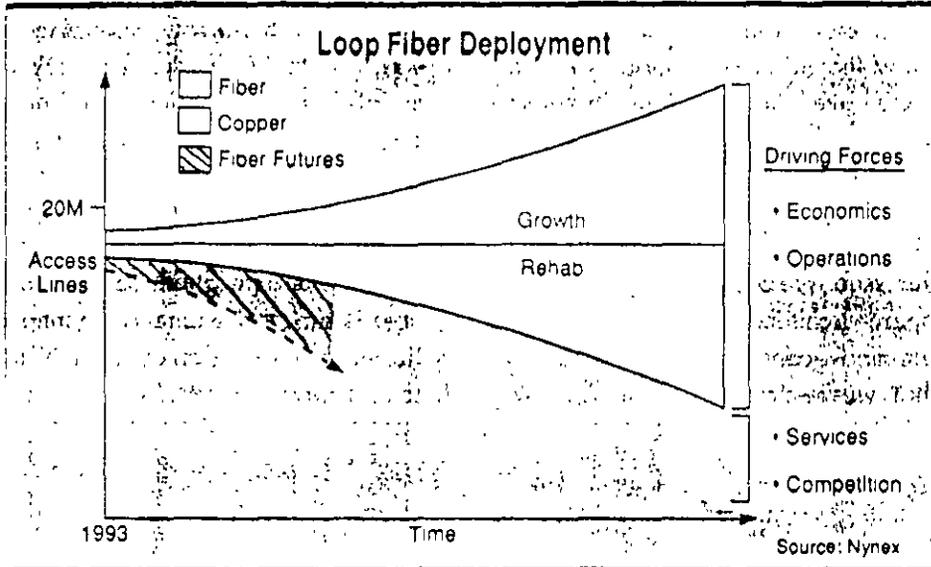
**ACCESO LOCAL DE BANDA ANCHA A PARQUES INDUSTRIALES**



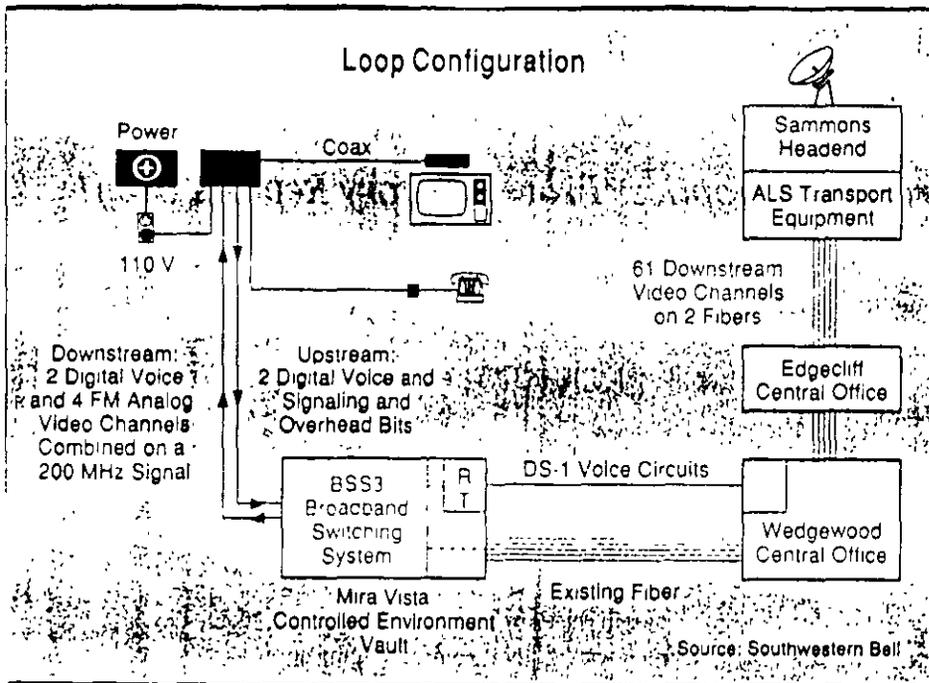
**RED INTEGRADA TIPO ESTRELLA DOBLE**



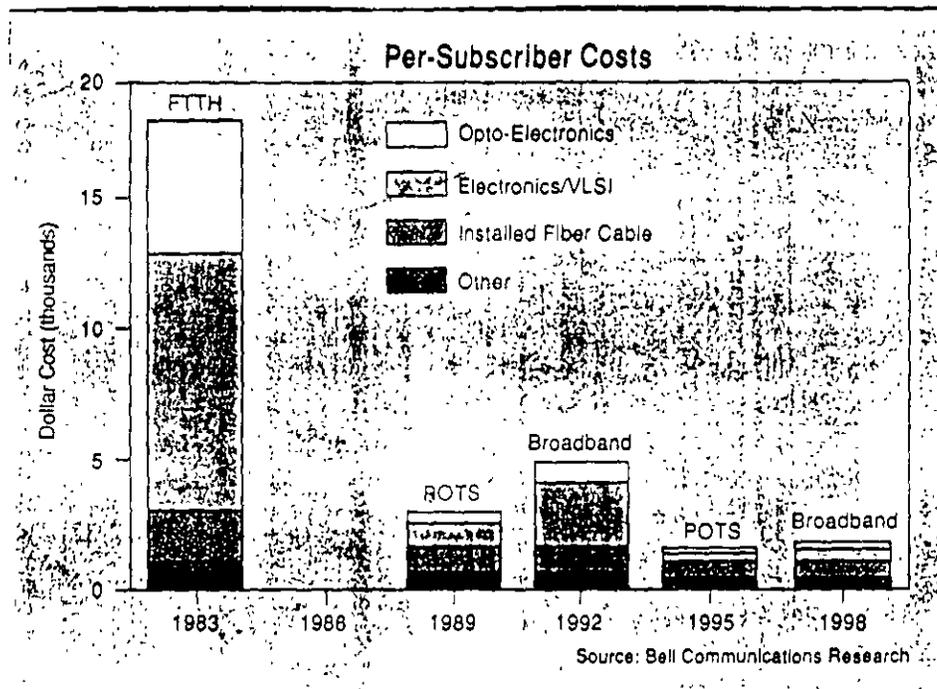
# SPECIAL REPORT



**Fiber will be deployed** in all new installations and rehabilitation projects when the cost difference between fiber and copper disappears. However, the installed base of fiber will still be small. Broadband services and competitive pressures will be the motivating factors accelerating the deployment of fiber.



**Mira Vista loop trial** in Fort Worth, Tex. delivers two digital voice and four analog video channels to the home over a single fiber.



**Opto-electronic component prices** dominate per-subscriber costs for fiber-to-the-home delivery of POTS and broadband services



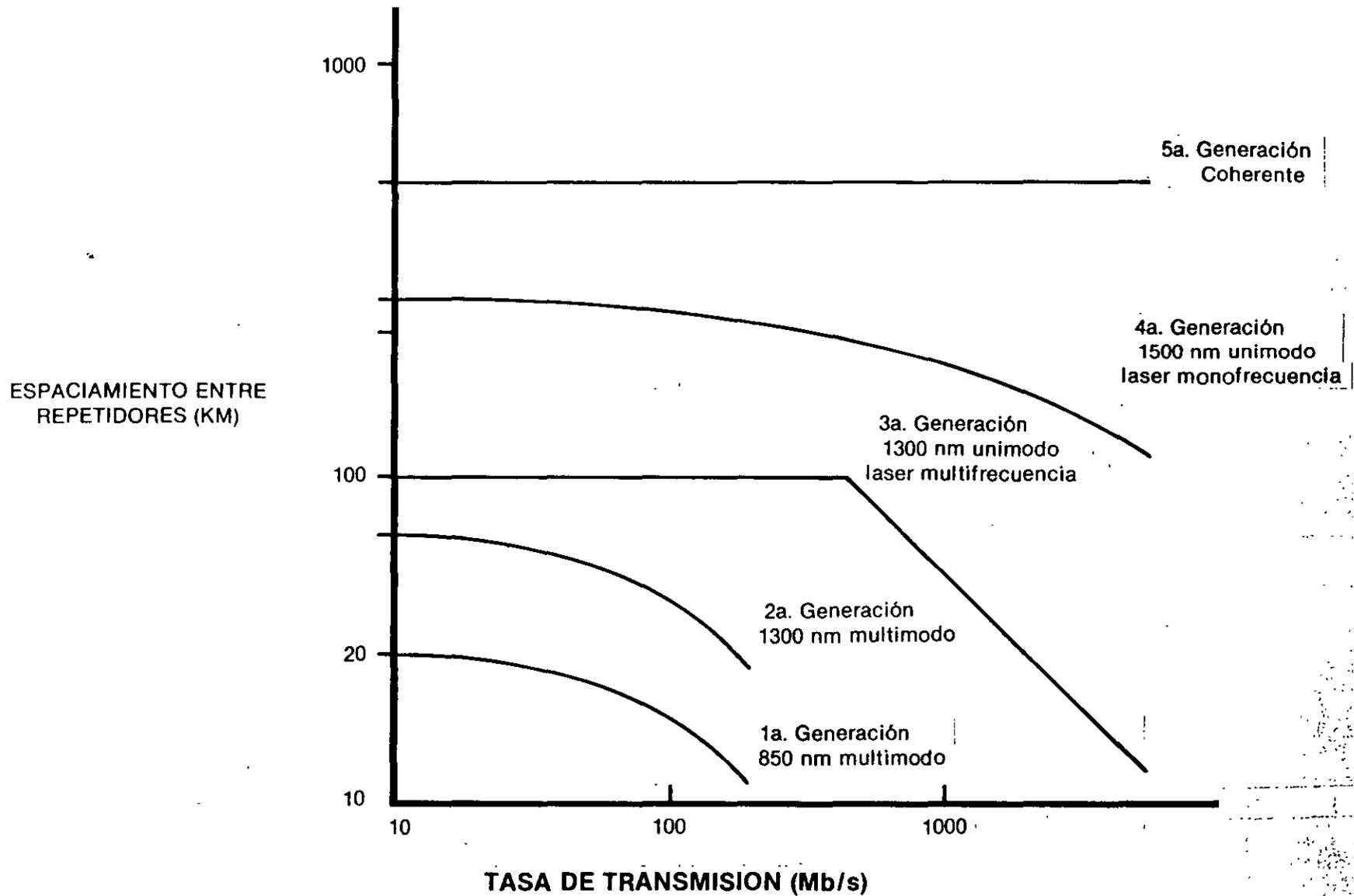
# FIBER-TO-THE-HOME TRIALS

Holding company	Operating company	Developer	Cable television company	Timeframe	Location	Number of residences	Switch	Electronics supplier	Transmission system/equipment	Transmission mode	Cable and fiber supplier/type	Notes/Services
BellSouth	Southern Bell	Heathrow Development Corp	Heathrow Telecommunications	9/89 Integrated voice & video	North Orlando, Fla.	55 now, 256 targeted	Northern Telecom DMS-100	Northern Telecom	LEDs and laser diodes	Singlemode digital	Northern Telecom for central office to residences. Optical Cable Corp. within homes	
BellSouth	Southern Bell	Genstar Southern Development Inc.	Hunter's Creek Cablevision, Genstar and Scientific-Atlanta	1986-CATV began, upgrades continue	South Orlando, Fla.	250		Scientific-Atlanta	LEDs	Single- and multimode	AT&T SM 48-fiber cable from headend to selector node; 5 multimode 144-fiber cables	
BellSouth	South Central Bell	Boyle Investment of Memphis	POTS only	11/88	Riveredge, Tenn.	54 so far, 99 targeted	AT&T 1A-ESS	AT&T System SCC-5 system and terminal	FT-series 1.7-gigabit/sec transmission system	Singlemode digital, analog for POTS	1 singlemode fiber	Same technology as is installed in Memphis telephone system
BellSouth	Southern Bell		POTS only	Began 8/89	Governor's Island, Lake Norman, N.C.	42 targeted	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	4th quarter 1989	Lakewood Terrace, Charleston, S.C.	100	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	Began 8/89	The Landings, Skidaway Island, Savannah, GA.	192	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	Began 8/89	Hunter's Creek II, Orlando, Fla.	117	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	8/89	Coca Plum, Miami, Fla.	45 initially, 300 eventually	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	1st quarter 1990	The Summit, Columbia, S.C.	285	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	1st quarter 1990	Morrowcroft, Charlotte, N.C.	50 now, 90 eventually	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
GTE Corp.	General Telephone of California	Existing community		2nd quarter '90	Cerritos, Calif.	705 targeted, 600 for POTS only, 100 for Still TV, and 5 for "jukebox video"		Amer. Light. Sys.		Analog video digital POTS	36 video channels and POTS over fiber optic subtrunk; hybrid video/voice/data over, singlemode fiber	
				2nd quarter '90	Cerritos, Calif.			GTE Labs		Digital	1 singlemode fiber	Switched video/voice/data; video on demand

GTE Corp.	General Telephone of California	Existing community	POTS	1989	Cerritos, Calif.	Existing r	GTE 2EAX	Analog	Twisted pair			
GTE Corp.	General Telephone of California	Existing community	Apollo Cablevision is leasing bandwidth	Main Street and 2nd quarter 1990	Cerritos, Calif.	250-300 targeted now, potentially 16,000	GTE Services Corp.	Digital	Cocsaal cable			
Contel	Contel Service Corp.		POTS only	4th quarter 1988	Ridgecrest, Calif.	100 targeted	AT&T 5-ESS AT&T Phoenix, Ariz.	AT&T Network Systems	Singlemode digital	Singlemode fiber	House wiring as it normally is	
Ameritech	Illinois Bell		POTS only	Late 1989	Chicago's northwest suburbs	300			Digital	2 singlemode fibers	Fiber optics set up in "active pedestal" format to get cost down to POTS	
Bell Atlantic	New Jersey Bell	Rieder and Sons	POTS only	8/88	"Princeton Gate," South Brunswick, N.J.	50 so far, 104 targeted	AT&T 5-ESS	AT&T Network Systems	Laser diodes	Digital	Singlemode fiber	4 dual lines per residence
Bell Atlantic	Bell of Pennsylvania	Rahab	Helicon	1st quarter 1989	Perryopolis, Pa.	80-100	Alcatel analog	Alcatel N.A.		Analog video; digital voice over multimode	62.5/125-micron multimode fiber	
Southwestern Bell	Southwestern Bell Telephone	Cedar Creek Properties Inc.		10/89	Cedar Creek, Olathe, Kan.	260			AT&T Series 5 SLC	Digital	Singlemode fiber	Fiber-to-the-pedestal
Southwestern Bell	Southwestern Bell Telephone		POTS only	1989	Leawood, Kan.	50-100	AT&T AESS	AT&T DDM-1000 time-division multiplexer	Laser diodes	AT&T digital subscriber loop carrier, digital/analog	AT&T singlemode fiber/twisted-pair copper "mixed" cable	
Southwestern Bell	Southwestern Bell Telephone		Sammon CATV	4th quarter 1989	Mira Vista, Ft. Worth, Tex.	80		Amer. Light. Sys.	Amer. Light. Sys.	ALS FM analog video and POTS	2 singlemode fibers	Fiber-to-home switched video
US West	Northwestern Bell		POTS only	2nd quarter 1989	Mendota Heights, Minn.	97 targeted	AT&T 5-ESS	AT&T Network Systems			Singlemode fiber	
US West	Mountain Bell		POTS only	1990	Desert Hills, Scottsdale, Ariz.	102 targeted	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLC	Digital	Singlemode fiber	
British Telecom	British Telecom		Single-line telephony passive optical network (TPON); voice only	Start 9/90	Bishops Stortford, U.K.	128 customers	BT	BT	BT passive WDM (TPON)	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
British Telecom	British Telecom			Start 9/90	Bishops Stortford, U.K.	125 business customers	BT	BT	BT passive WDM (TPON)	Singlemode digital	1 singlemode fiber	Business TPON; voice only
British Telecom	British Telecom			Start 9/90	Bishops Stortford, U.K.	128 customers	BT	BT	BT passive WDM (TPON)	Singlemode digital/copper	1 singlemode fiber	Single-line street TPON; voice only
British Telecom	British Telecom		Broadband distributed star; voice, TV and other services	Start 3/90	Bishops Stortford, U.K.	125 residential customers	BT switched star	BT	BT passive WDM (TPON)	Singlemode digital	1 singlemode fiber	Similar to Westchester cable TV network in U.K.
Nymex	Raynet		POTS only	1989	Lynnfield, Mass.	100					65/125-micron multimode fiber	Fiber-to-the-curb

Information for this chart compiled by John Kreidl.

# LAS 5 GENERACIONES EN SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA



## LA FDDI Y SU IMPACTO EN LAS R.D.S.I DE LOS 90'S

Ing. Gerardo Chávez Díaz  
NOVELLCO DE MEXICO

### 1.- INTRODUCCION

El mercado que tradicionalmente ha cubierto la fibra óptica a nivel internacional ha sido el de las comunicaciones de larga distancia. Dicho mercado en el caso de Estados Unidos sufrirá en los años venideros un decremento importante, después de una etapa de estabilidad; sin embargo, a nivel general, la demanda de las fibras ópticas permanece sostenida y con un incremento importante en otros sectores de aplicación, representando con ello "nichos" para esta tecnología. Algunos de ellos son los sistemas de Comunicación Submarina, Redes de Area Metropolitana (MAN'S) y el cableado para redes en edificios o parques industriales para la transmisión de datos.

Entre los factores que han contribuido al fortalecimiento de las fibras ópticas en dichos mercados se encuentran el establecimiento de estándares e interfaces de comunicación como es el caso de la fibra óptica de 62.5/125 micras para redes locales (LAN), la tendencia hacia el uso de conectores ópticos tipo ST para dichas aplicaciones, y la reciente liberación de los estándares de la Interfaz de Datos Distribuida por Fibra (FDDI).

Las ventas en el caso de cables para la transmisión óptica en larga distancia descendieron en Estados Unidos de 961,000 Km-fibra en 1987 a 504,000 Km-fibra durante 1988. A pesar de ello, no se espera un impacto proporcional en los equipos de transmisión para este mercado, ya que por otra parte las compañías proveedoras de estos servicios continúan aumentando la capacidad de sus equipos alcanzando velocidades que van desde 1.17 Gbps hasta 2 Gbps durante el presente año.

En contraste con otros países como es el caso de China, India y México se espera un despegue en los próximos años de esta tecnología aplicadas en larga distancia, mediante proyectos de Comunicación Terrestre y/o Submarina.

En el sector de transmisión de datos, durante los últimos años han existido una diversidad de equipos, componentes y arquitecturas de operación que han permitido aplicaciones

básicas de punto a punto basadas en la utilización de modems y multiplexores ópticos. Recientemente, la aplicación de las fibras ópticas en el ambiente de las redes locales han requerido la especialización de productos y servicios para este sector.

De hecho, la demanda de equipo para redes locales es en la actualidad una de las áreas de mayor crecimiento a nivel mundial; así, se ha proyectado un crecimiento de las redes locales vía fibras ópticas con una tasa anual promedio del 47% hasta 1993, mientras que las redes con otros medios de comunicación crecerán a una tasa de aproximadamente el 25% en este mismo período.

Dentro de este mismo sector los principales usuarios de dicha tecnología serán en primer término las corporaciones industriales, y en seguida los campus universitarios, las fábricas, la industria militar, los hospitales y la industria editorial.

## 2.- ACCESO A LA FDDI

Una de las formas para aprovechar de manera óptima las ventajas que ofrece la tecnología de fibras ópticas es mediante la aplicación en forma jerárquica de la red de datos.

Así, dichas redes se desarrollarán acordes con las necesidades de capacidad y velocidades de transmisión; esto nos permite, como consecuencia, un crecimiento modular y una mejor planeación del sistema.

Existen cuatro niveles jerárquicos principales:

- a) Redes distribuidas de baja velocidad (de Kbps hasta algunos Mbps).
- b) Redes Intermedias (de 10 Mbps hasta algunas decenas de Mbps).
- c) Redes Columna Vertebral de Datos FDDI (de 100 Mbps hasta algunos cientos de Mbps).
- d) Redes Columna Vertebral de Alta Velocidad (hasta 1 Gbps).

Esta estructura nos ofrece un fácil acceso entre redes así como la conexión vía "Gateways" o concentradores.

a) Redes de Baja Velocidad

El objeto de estas redes es ofrecer a los usuarios soluciones de conectividad de bajo costo a través de los estándares de tipo ArcNet. Dicho estandar con protocolo "Token-Passing" opera a una velocidad de 2.5 Mb/s y fue creado en 1977 por DATAPOINT Corp. Aunque originalmente fue desarrollada para operar con cable coaxial y par torcido, existen actualmente topologías de estrella-pasiva con fibra óptica; la versión de 20 Mb/s es conocida como ArcNet Plus y es totalmente compatible con la de 2.5 Mb/s.

Como apoyo a la utilización de la tecnología de fibras ópticas se han logrado reducciones importantes en los precios de los dispositivos optoelectrónicos con la difusión de la fibras plásticas en dichas redes.

b) Redes Intermedias

Estas redes son empleadas para la comunicación entre microcomputadoras y los Mainframes, y utilizan estándares como el IEEE 802.3, 802.4, 802.5, de los cuales el más comúnmente usado con fibras es el de la configuración EtherNet con alrededor de 10,000 nodos en operación a nivel internacional.

c) Redes Columna Vertebral de Datos (FDDI)

Las redes para aplicaciones de alta velocidad se han apoyado importantemente en la Interfaz de Datos Distribuida por Fibra (FDDI) mediante una red doble-anillo a 100 Mb/s con protocolo Token-Passing; en este estandar han participado alrededor de 250 empresas permitiendo con ello un rápido abatimiento en los costos de desarrollo del producto y haciéndolo sumamente competitivo con los medios tradicionales de comunicación.

d) Redes Columna Vertebral de Alta Velocidad

Estas redes están constituidas por varias del tipo FDDI en paralelo, manejando alternativas para la transmisión de voz, video y datos, que demandan un gran ancho de banda (B-ISDN) y velocidades de transmisión del orden de Gbps; es en este punto donde los esfuerzos tecnológicos orientados hacia el desarrollo de los servicios integrados han cobrado gran importancia debido a las bondades de la fibra óptica por un lado y a la fuerza que el estandar FDDI está tomando en el mercado internacional.

## - ESTRUCTURA DE LA FDDI

Las especificaciones de la FDDI han sido desarrolladas por el comité X3T9.5 de la ANSI (American National Standards Institute) y están relacionadas con los niveles 1 y 2 del modelo OSI. La FDDI emplea un protocolo de acceso tipo Token-Passing a una velocidad de transmisión de 100 Mbps con la posibilidad de soportar hasta 1,000 conexiones y con una máxima distancia de enlace de 200 Km. La máxima distancia entre dos nodos adyacentes es de 2 Km utilizando una fibra multimodo de 65.5/125 micras en una ventana de operación de 1,300 NM.

Dichas especificaciones están organizadas en 4 partes:

- 1) La administración de estaciones (SMT) define el control requerido para la operación e intercomunicación de las estaciones dentro del anillo FDDI.
- 2) El Control de Acceso Medio (MAC) que define el formato de la trama de datos, la interpretación de su contenido y el mecanismo de "Token-Passing".
- 3) La capa física (PHY) que especifica la codificación, decodificación y el reloj; y
- 4) La dependencia del medio físico (PMD) que se refiere a los tranceptores ópticos, conectores y tipo de cable óptico utilizado.

Existen además tres tipos de dispositivos utilizados por la red FDDI; estos son los concentradores (CONS), las estaciones de acceso único (SAS) y las estaciones de acceso doble (DAS); así, los concentradores pueden ser accesados en forma única o doble. Por su parte, los "DAS" pueden enlazarse con otras "DAS" o "CONS"; un "CONS" puede también ser utilizado como un dispositivo individual que conecte varios "SAS" a manera de red local, o como un "HUB" en una red mayor donde se conecten "CONS", "DAS" y "SAS".

De esta manera, la topología de la red FDDI se definirá como un "anillo doble de árboles". Hay tres variaciones de dicha topología basadas en los dispositivos antes mencionados, que son:

- Anillo Doble,
- Arbol,
- Anillo Doble de Arboles.

En la topología de Anillo Doble, las "DAS" son conectadas entre ellas para formar un "lazo físico"; todas las estaciones son de tipo "DAS" y no se utilizan "CONS" o "SAS".

Por otra parte, en la topología de Arbol las "SAS" son enlazadas a un "CONS" en forma de estrella y no se emplean las "DAS" en la red; en la posibilidad de que una "DAS" se conecte a la red, ésta se comportará como una "SAS". Además, dichos "CONS" pueden ser colocados en cascada a nivel jerárquico.

En el caso de la topología de Anillo Doble de Árboles son conectados a un anillo doble junto con las "DAS"; como su nombre lo indica, esta red está concebida como un anillo doble al cual uno o mas árboles se conectan.

En la red FDDI existen 2 tipos de dispositivos utilizados: uno para usuario final, que son las estaciones de trabajo y los servidores de archivo (File Server), y otro para la columna vertebral, que son los concentradores, los puentes y los "ruteadores". En ambos casos éstos pueden implementarse como "SAS" o "DAS"; sin embargo la implementación de las "SAS" en un doble anillo de árboles provee un mejor respaldo a la operación de red.

En el concepto básico de la red Anillo cada estación es considerada como un repetidor y puede representar un punto de falla; en un enlace físico, inclusive esto puede significar la ruptura del anillo. Dicha probabilidad puede aumentar sustancialmente conforme el número de estaciones se incrementa, por lo que el soporte del doble anillo resulta muy importante. Así, en el caso de que alguna estación se desactive o reubique, o alguno de los cables de los anillos sufra algún daño, el sistema de red se reconfigurará para establecer un nuevo enlace.

Por su parte la topología de Arbol ofrece la tolerancia a fallas a través de dos caminos: si la falla ocurre en la porción del árbol ya sea en la estación o en el cable que conecta a la "SAS" con el "CONS", se establecerá en forma automática el "reenrutamiento" a través del concentrador de tantas estaciones como sea necesario; esto mismo ocurrirá en el caso de fallas múltiples.

La combinación de ambas por lo tanto refuerza la operatividad de la red y la tolerancia a fallas de la misma.

## .- USO DE LAS ESTACIONES FDDI

La aplicación de las estaciones tipo "SAS" en general resulta más cómoda y económica para el administrador de red si la comparamos con las de tipo "DAS", ya que en el caso de redes con un gran número de usuarios el "reenrutamiento" resulta más accesible a través de los "CONS" que la reordenación de la ruta ante la presencia de una falla en una "DAS". Esto repercute en los costos de cableado y conectorizado que, a manera de ejemplo en una red de 200 nodos puede representar alrededor de 15,000 USD de ahorro en el costo de instalación.

En algunas aplicaciones de bajo número de usuarios se emplean técnicas alternativas como es el uso de relevadores (alrededor de 10 estaciones) pero limitan sustancialmente el alcance a 200 mts entre nodos, lo cual implica una reducción con respecto a los 2 Km marcados por el estandar.

## .- APLICACIONES DE LA FDDI

La utilización de las redes FDDI se ha concentrado en tres ambientes principales:

- a) Instalación en campus o parques industriales, mediante el cableado entre edificios empleando el concepto de columna vertebral de alta velocidad (hasta varios Km de distancia).
- b) Instalación en edificios, a través del cableado de oficinas del mismo piso o en diferentes niveles. Dicho cableado resulta por lo general definitivo e involucra a un gran número de usuarios finales, así como dispositivos para la columna vertebral con distancias relativamente cortas (varios cientos de metros).
- c) Instalación en centros de cómputo, donde el número de usuarios es reducido y las distancias son cortas (decenas de metros) lo cual requiera de una gran flexibilidad en la red instalada.

Para analizar y definir la problemática de planeación e instalación de este tipo de redes, se está desarrollando actualmente en Estados Unidos el estandar EIA TR 41.8.1 que normará la aplicación en edificios de la FDDI.

A nivel internacional se están realizando importantes esfuerzos para la difusión de la FDDI a través de empresas como Proteon Inc., que recientemente ha sido escogida para la instalación de una red en la Universidad de Singapore con

2,000 nodos y establecer la conectividad con un Mainframe 3081 IBM y una supercomputadora NEC; de igual forma CODENOLL TECHNOLOGY CORP. ha lanzado a fines del año pasado su línea CODENET FDDI para las computadoras EISA, la cual es compatible con el software de red Novell NetWare 386, así como los estándares ISO-9384 y el ya mencionado ANSI X3T9.5; asimismo, la compañía Synoptics Communications Inc. está ofreciendo la conectividad a todos los ambientes ya sea EtherNet, Token Ring y FDDI a través de su topología de "estrella jerárquica" con par torcido de cobre, con lo que el concepto de columna vertebral de alta velocidad repercute importantemente en la reducción de costos totales de la red.

## 6.- CONCLUSIONES

Con la liberación del SMT a principios de este año por el comité ANSI X3T9.5, finalizará la primera etapa de la red FDDI. Sin embargo ya se está trabajando en paralelo con una versión del sub-nivel PMD para fibra óptica unimodo que permitirá un espaciamiento entre nodos FDDI hasta de 60 Km, lo cual posicionará estratégicamente a la FDDI en el mercado de MANS, y como consecuencia, en la competencia con las compañías telefónicas que ofrezcan multiservicios al usuario; esto se viene a reafirmar con el concepto de la FDDI-2 que brindará servicios de voz, video y datos a través de la red doble anillo.

Con todo ello se espera un crecimiento exponencial en la demanda de este producto en los primeros años de la década, aumentando la base instalada de alrededor de 3,000 transceptores en 1990, a 22,000 para 1991, y 200,000 para 1993. Las aplicaciones estarán orientadas a la transmisión de imágenes y bases de datos a grandes velocidades y con enlaces a redes más lentas de propósito específico (voz/video/datos) que permitirán la conectividad de diferentes ambientes y el uso de medios de comunicación sumamente variados.

## REFERENCIAS

- 1.- MACK, R., "FIBEROPTICS POISED FOR RAPID GROWTH IN THE 1990'S", LASER FOCUS WORLD, DEC. 1989.
- 2.- REED, T., "FIBER JOINS FACTORY AUTOMATION SYSTEMS", PHOTONICS SPECTRA, NOV. 1989.
- 3.- MARSH, J., "FDDI DUAL RING OF TREES TOPOLOGY", TELECOMMUNICATIONS, OCT. 1989.
- 4.- PROTEON NEWS RELEASE DECEMBER 1989.
- 5.- CODENOLL TECHNOLOGY CORP. NEWS RELEASE NOVEMBER 1989.
- 6.- SYNOPTICS COMMUNICATIONS INC. CONNECTIVITY PRODUCTS GUIDE, 1989-1990.

**F D D I :**

**LA RED LOCAL OPTICA  
DE ALTA VELOCIDAD**

**FDDI = FIBER DISTRIBUTED  
DATA INTERFACE**

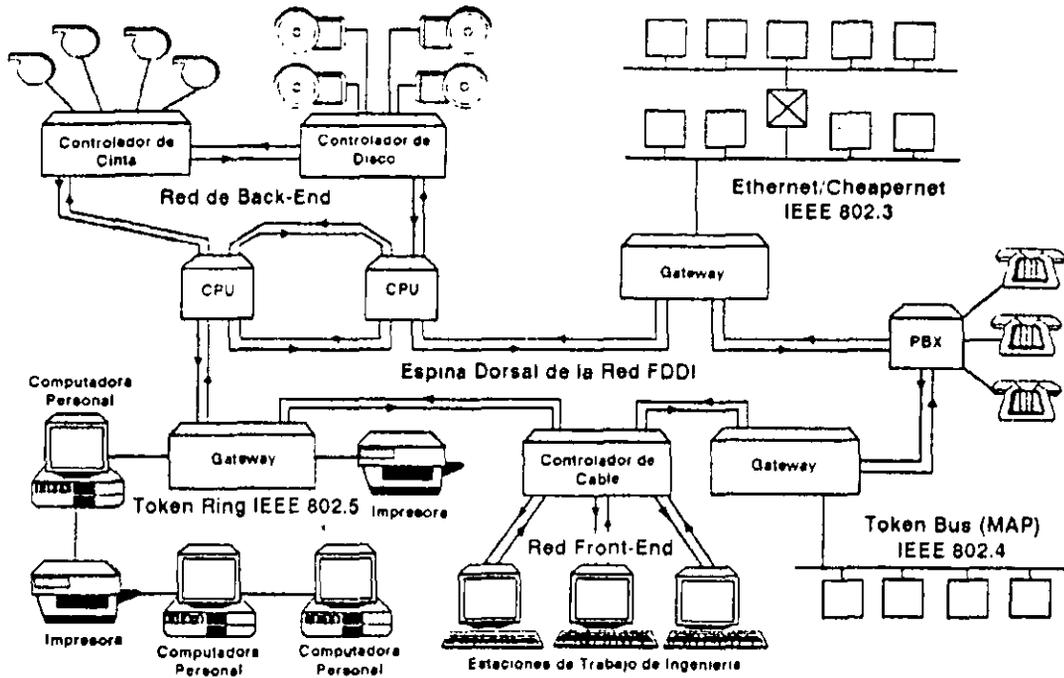
**RED ANILLO TOKEN- PASSING 100 Mb/S  
CON REDUNDANCIA. (ANSI - X3T9)**

**ANILLO PRINCIPAL= CONEXION PUNTO A PUNTO  
ENTRE NODOS PARA  
TRANSMISION DE DATOS.**

**ANILLO SECUNDARIO = TRANSMISION DE DATOS /  
RESPALDO DEL ANILLO  
PRINCIPAL EN CASO DE FALLA.**

**FDDI PROVEE COMUNICACIONES POR  
CONMUTACION DE PAQUETES Y  
TRANSMISION DE DATOS EN TIEMPO  
REAL.**

# POSIBLES APLICACIONES DEL FDDI



**FDDI OFRECE HASTA 1000 CONEXIONES FISICAS (500 ESTACIONES) Y UNA DISTANCIA TOTAL DE 200 KM. DE EXTREMO A EXTREMO.**

**LA DISTANCIA MAXIMA ENTRE NODOS ACTIVOS ES LA DE 2 KM.**

## **FIBRAS OPTICAS EMPLEADAS:**

**A) FIBRA TIPO UNIMODO. CON GRAN ANCHO DE BANDA (GHz. KM) Y LARGAS DISTANCIAS (20 - 30 KM)**

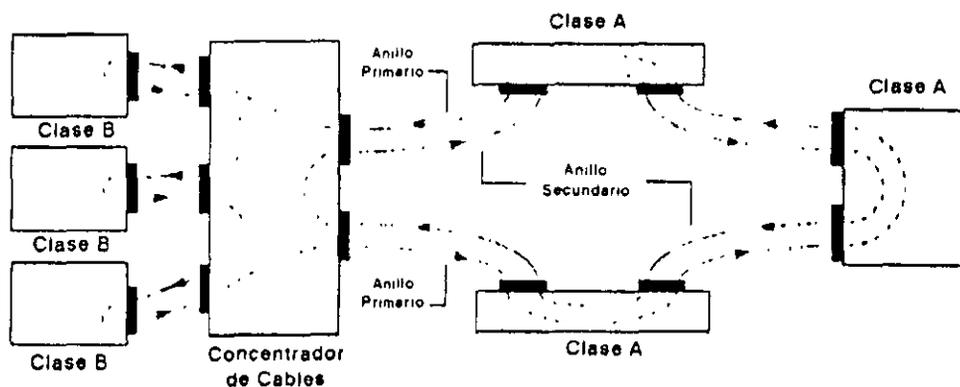
**B) FIBRA TIPO MULTIMODO. FIBRAS CON NUCLEO 50-62.5 MICRAS Y MEDIANAS DISTANCIAS (10 - 20 KM) A 1300 NANOMETROS.**

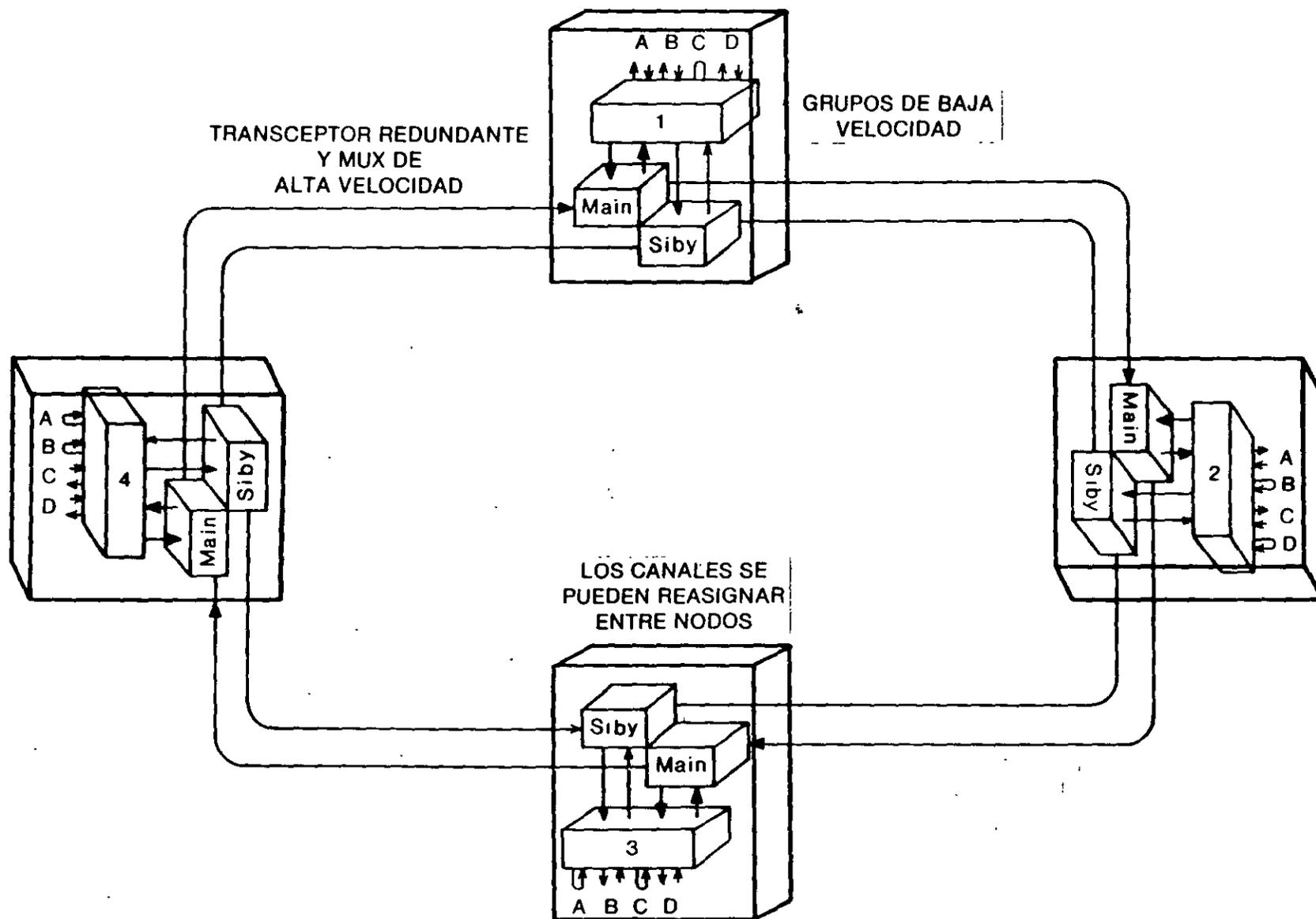
## ESTACIONES:

TIPO CLASE A : SE CONECTA DIRECTAMENTE AL ANILLO DOBLE.

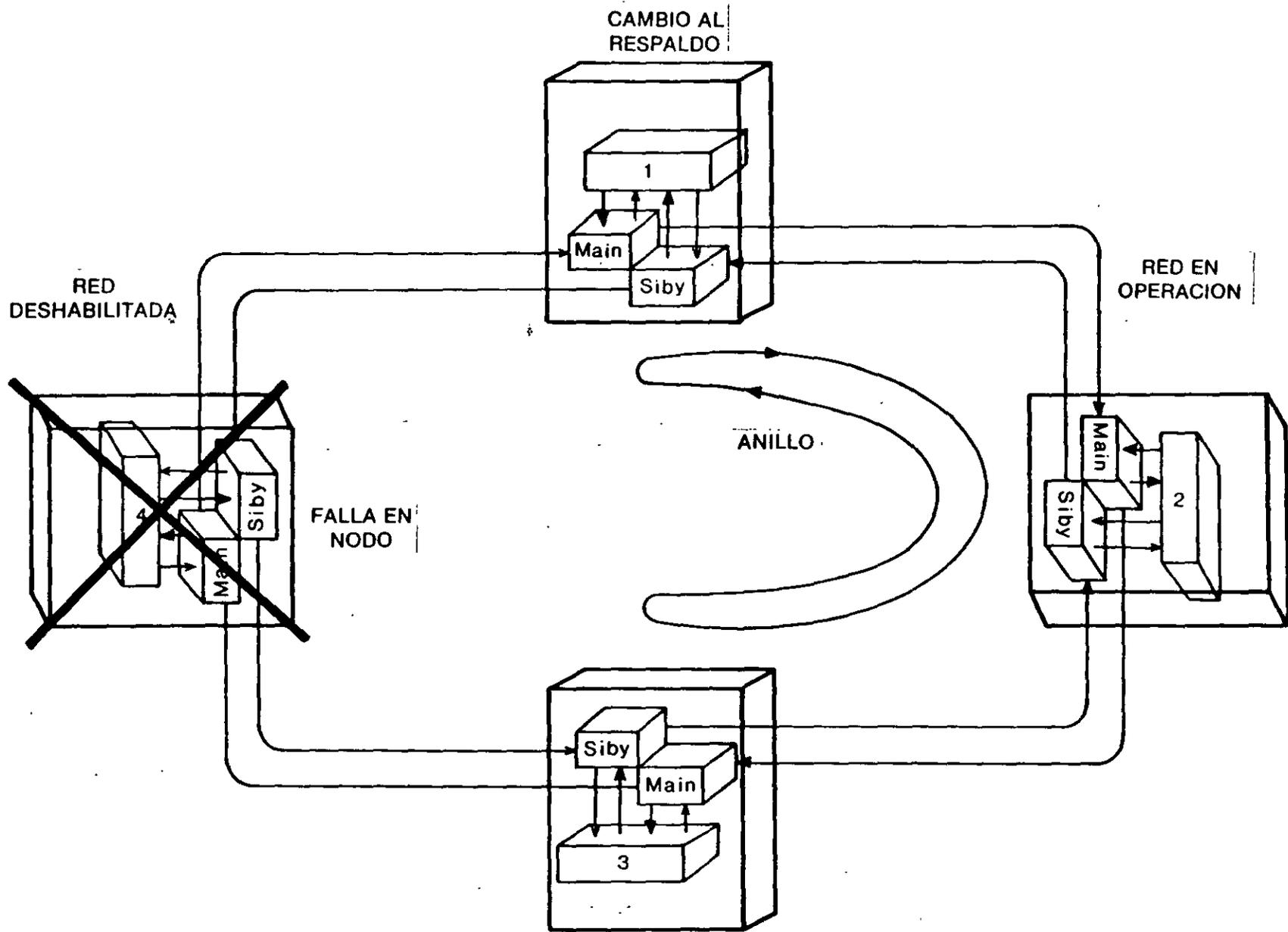
TIPO CLASE B: SE CONECTAN AL CONCENTRADOR DE PUERTOS MULTIPLES EN RED ESTRELLA O ESTACIONES CON POSIBILIDAD DE CONEXION SENCILLA. LOS CONCENTRADORES PUEDEN SER CONECTADOS EN CASCADA.

### EJEMPLO DE ANILLO FDDI

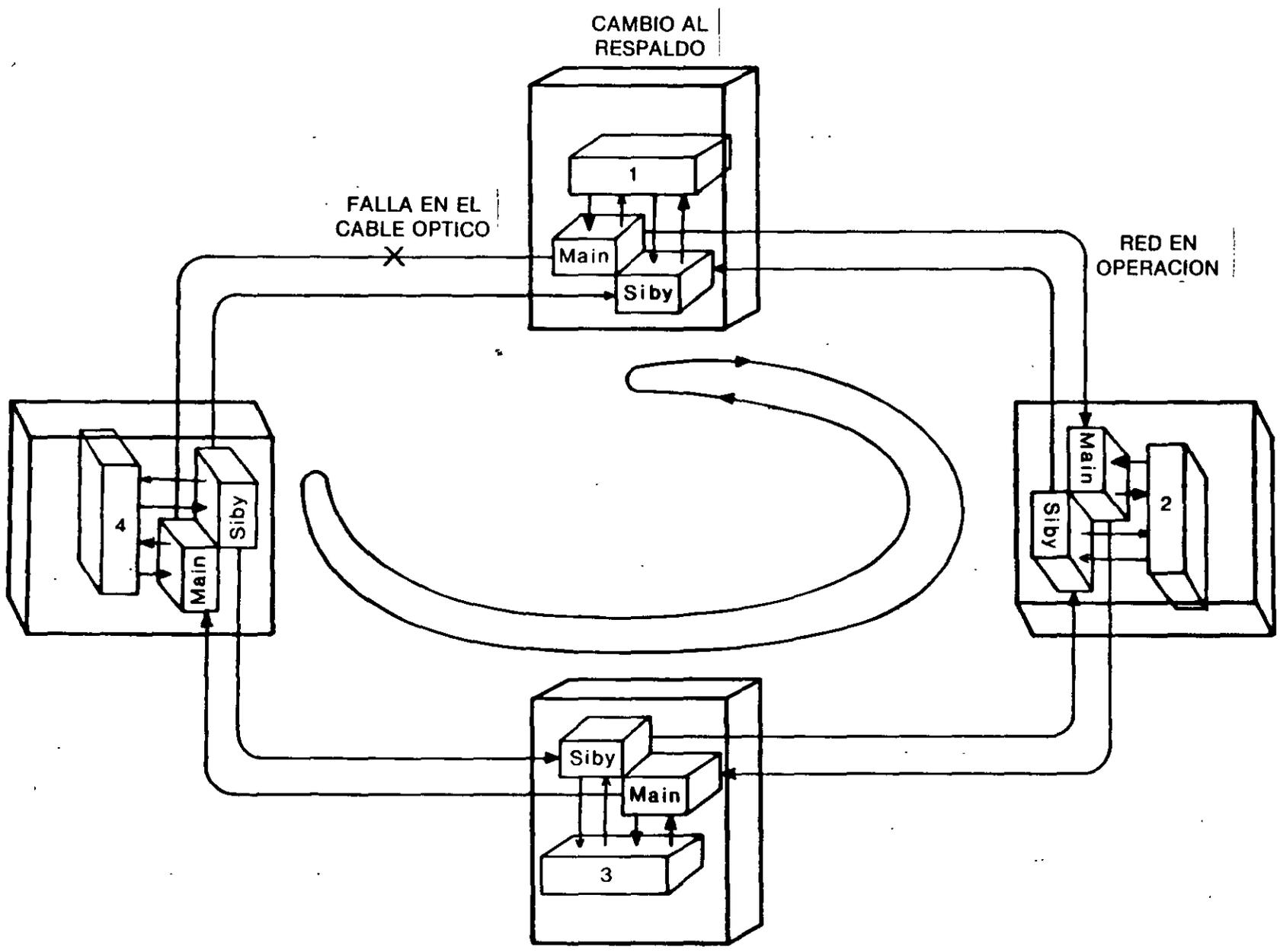




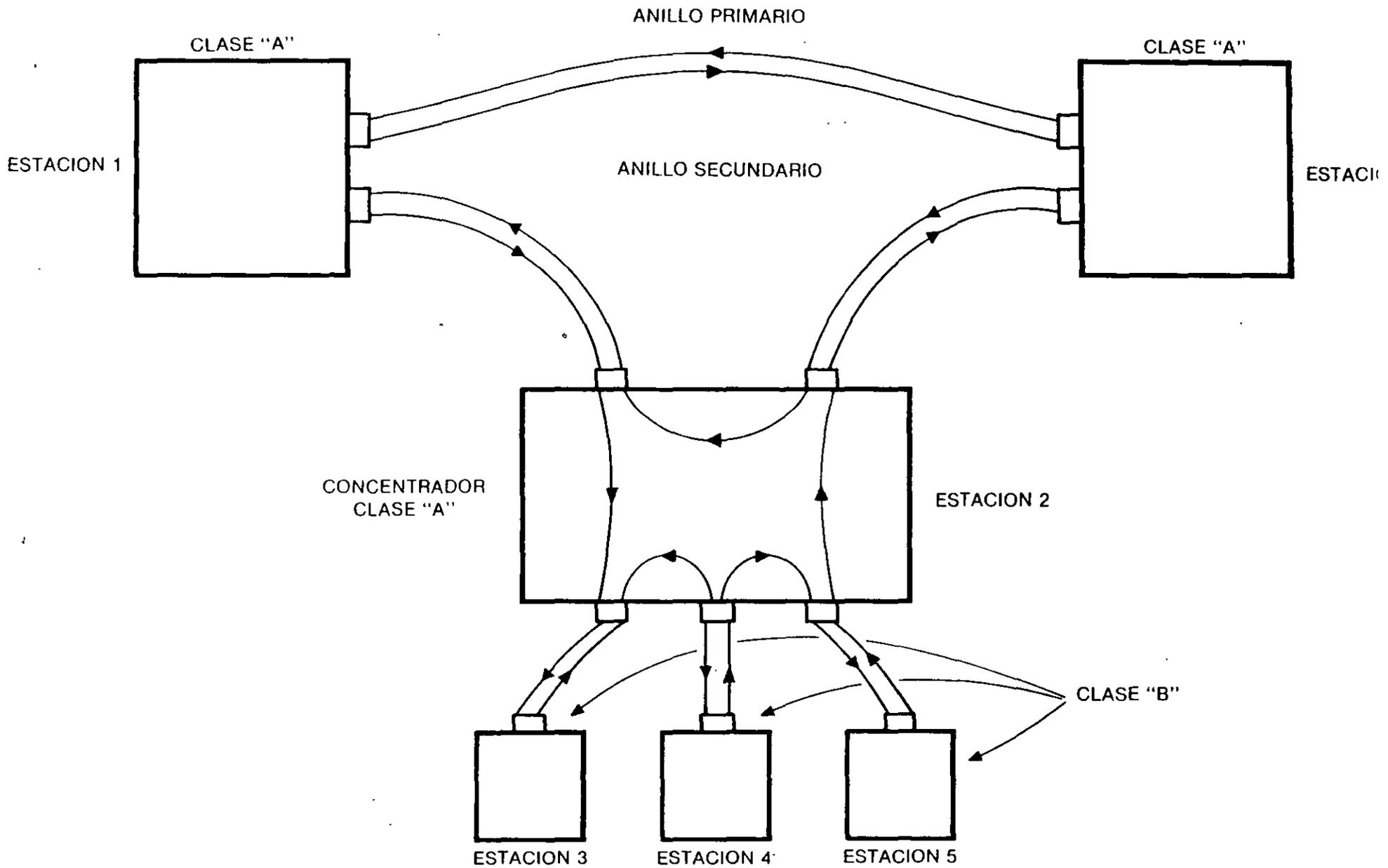
**RED ANILLO DE BANDA ANCHA CON FIBRA OPTICA**



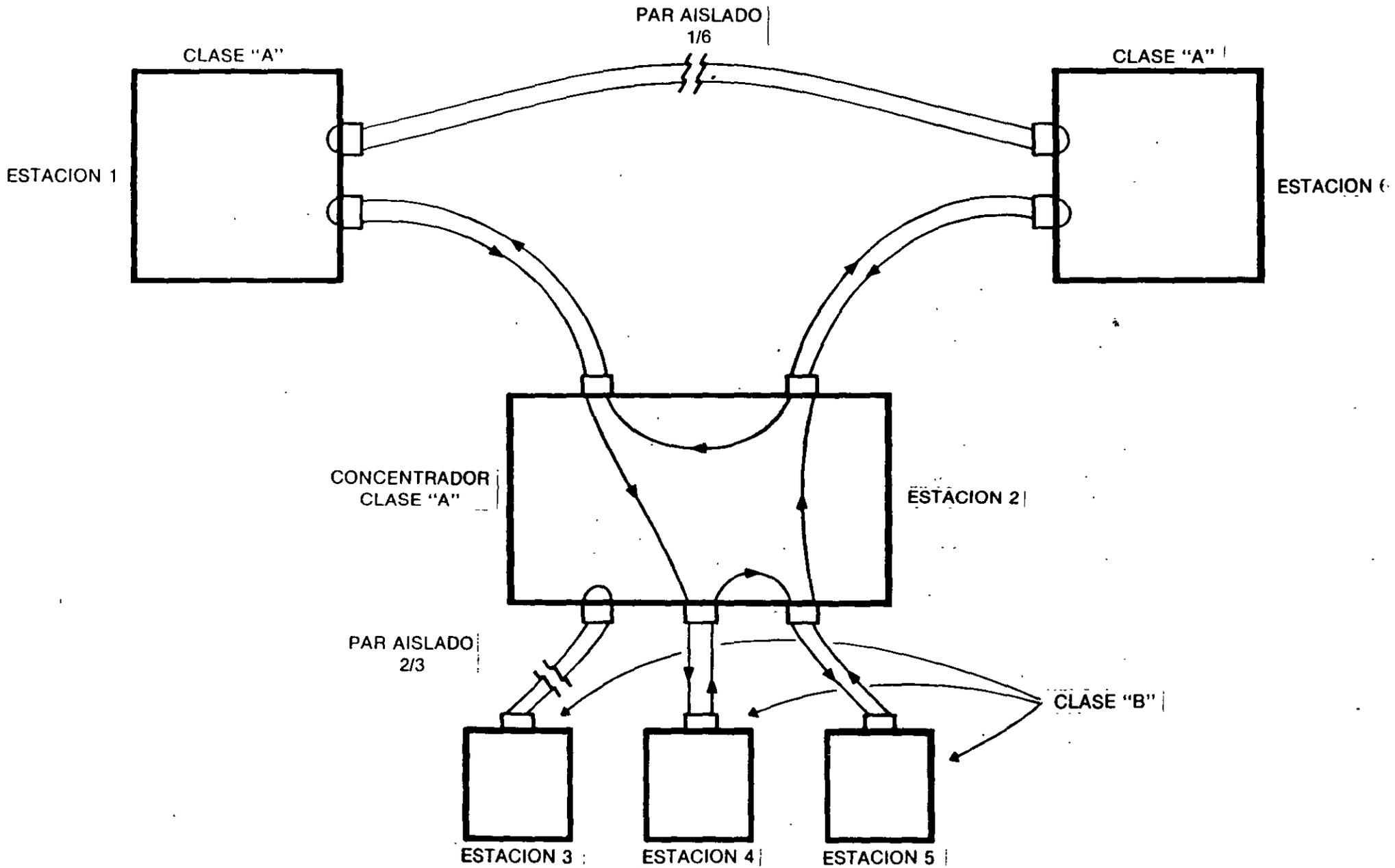
**FALLA DE NODO EN LA RED ANILLO**



FALLA DE CABLE OPTICO EN LA RED ANILLO

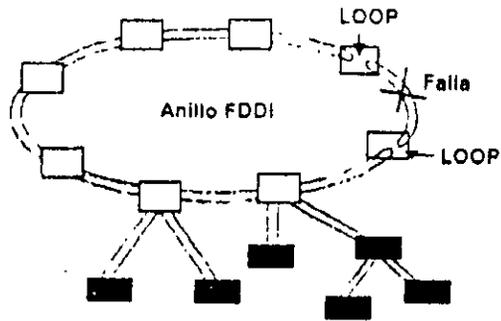


**TOPOLOGIA ANILLO FDDI**

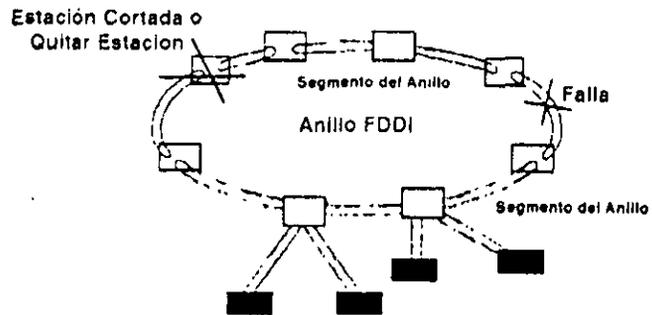


**ANILLO FDDI RECONFIGURADO**

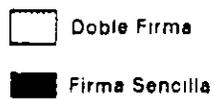
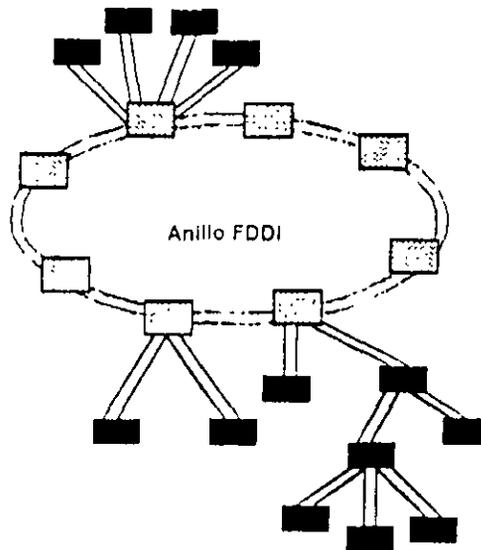
## UNA FALLA



## FALLAS MULTIPLES



## ESTACION/CONCENTRADOR



**TOKEN-PASSING OFRECE UNA TRANSMISION DE DATOS MAS EFICIENTE, YA QUE CONFORME AUMENTA EL TRAFICO SE REQUIERE UN MAYOR ANCHO DE BANDA. TRT) 85%**

**CSMA/CD RESULTA MAS EFICIENTE CUANDO SE UTILIZA UN MENOR ANCHO DE BANDA.**

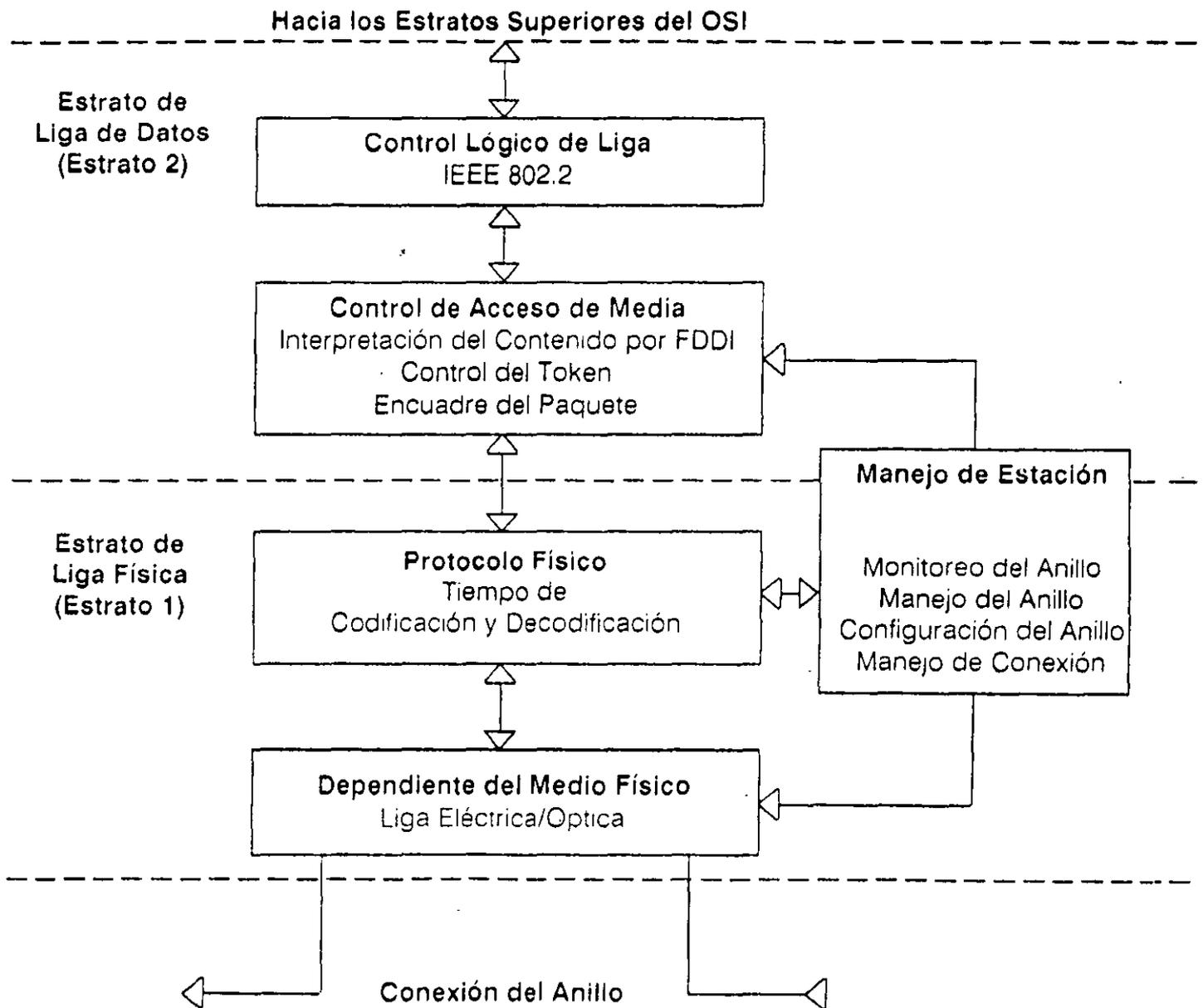
**FDDI EMPLEA UNA CODIFICACION 4B/5B. TASAS DE TRANSMISION A 100 Mb/S - 125 MHz. 80% DE EFICIENCIA EN EL ANCHO DE BANDA.**

**ETHERNET Y TOKEN-RING EMPLEAN UNA CODIFICACION MANCHESTER**

<b>TASA</b>		
<b>DE TRANSMISION -</b>	<b>ETHERNET:</b>	<b>10 Mb/S - 20 MHz</b>
	<b>TOKEN-RING:</b>	<b>16 Mb/S - 32 MHz</b>

**50% DE EFICIENCIA EN EL ANCHO DE BANDA**

# LOS ESTRATOS DE FDDI



## **FDDI: VS. TOKEN-RING 16Mb/S:**

**RELOJ DISTRIBUIDO Y  
RECUPERACION DE  
ERRORES.**

**MONITOR ACTIVO.**

**DOBLE ANILLO.**

**ANILLO SENCILLO.**

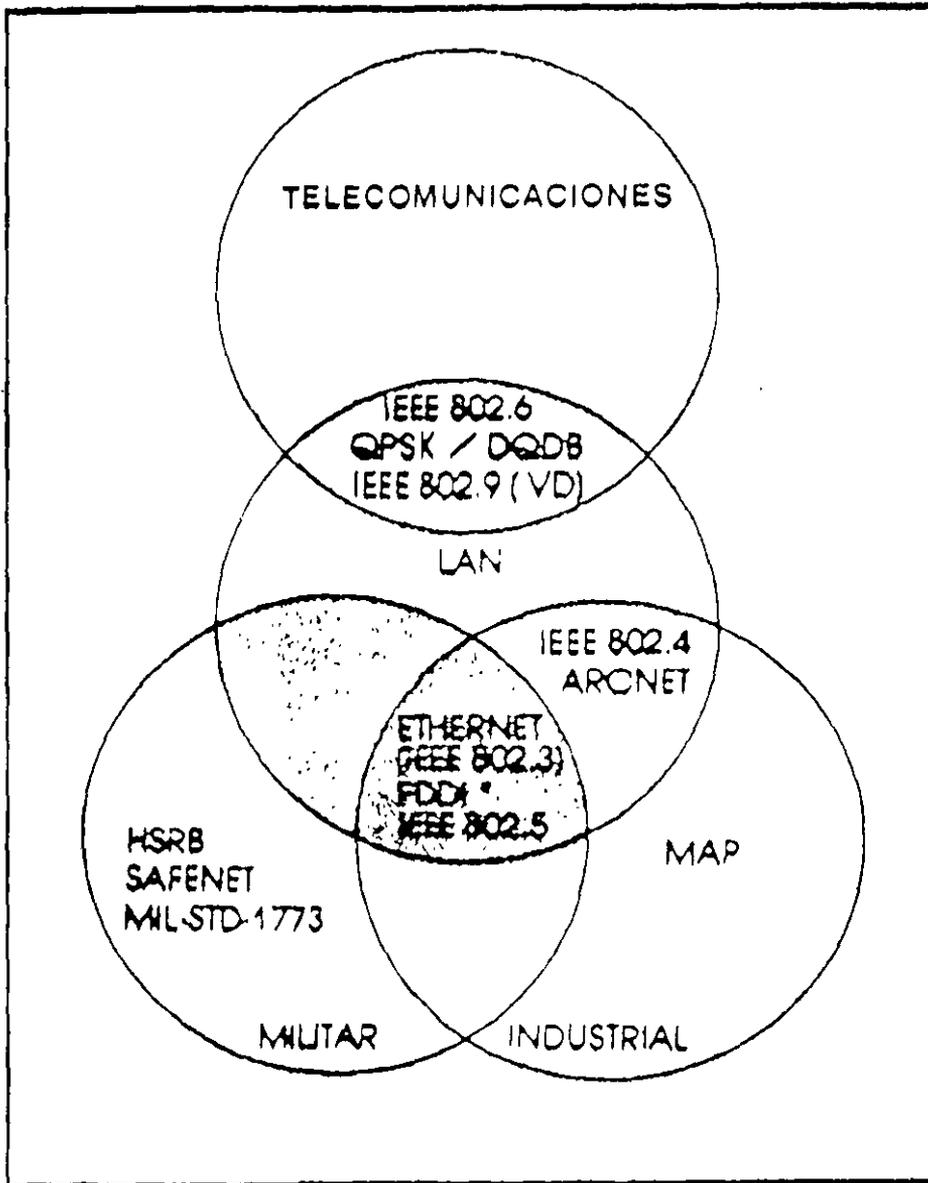
**ROTACION DEL  
"TOKEN ".**

**SISTEMA DE RESERACION POR  
PRIORIDAD.**

**USO DE FIBRA OPTICA**

**USO DE PAR TORCIDO / FIBRA  
OPTICA.**

**FDDI-2 = VOZ, DATOS, VIDEO (TDM)**



ESTANDARES DE RED QUE EMPLEAN FIBRA OPTICA POR APLICACION

**TABLA 1**  
**PROPIEDADES vs VENTAJAS DE LOS SISTEMAS POR**  
**FIBRA OPTICA**

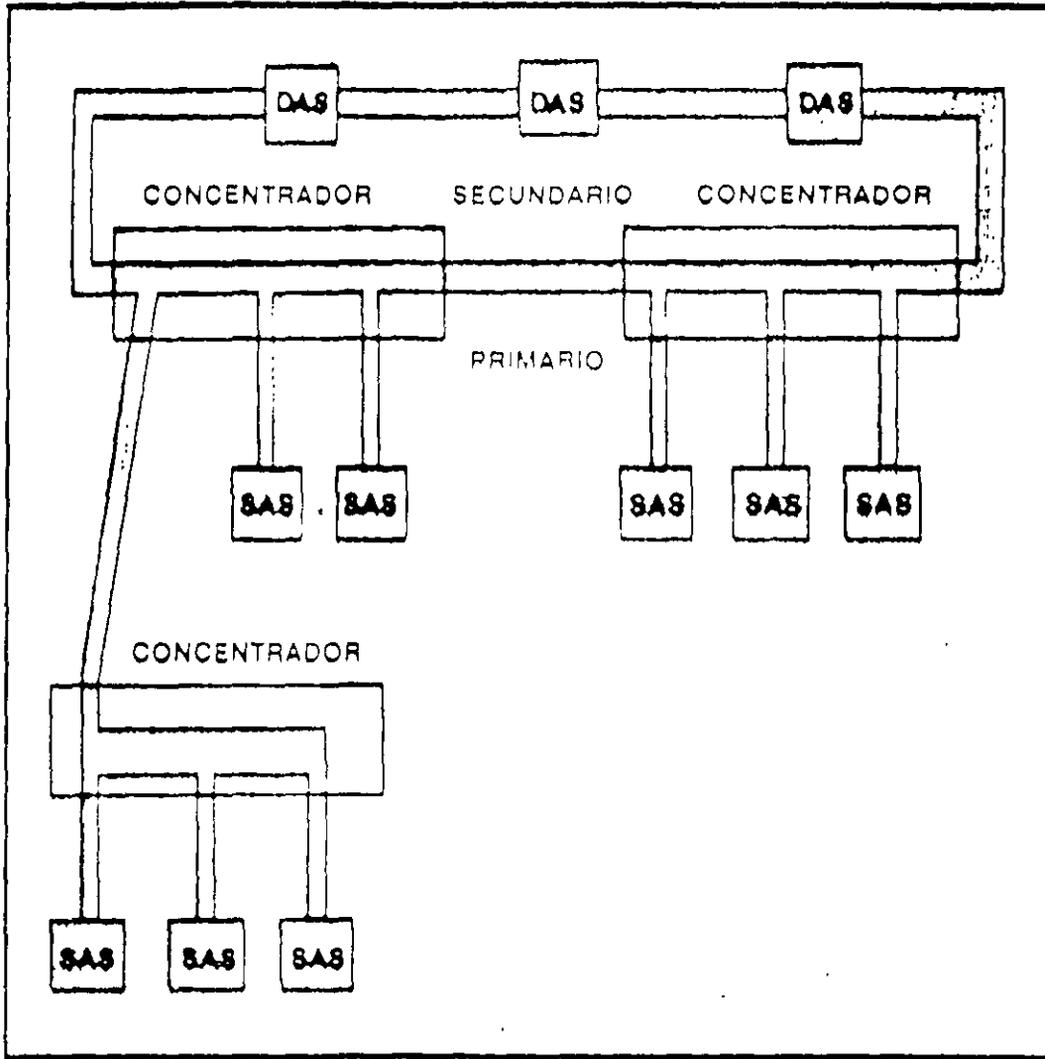
	COSTO DECRECIENTE				INCREMENTO EN LA SEGURIDAD		DISEÑO SIMPLE		CALIDAD DE INFORMACION	
	EQUIPO INICIAL	INSTALACION INICIAL	MANTEENIMIENTO CONTINUO	POSIBILIDAD DE EXPANSION	PERSONAL	EQUIPOS	SISTEMA DE COMUNICACIONES	PLANTA	ESTABILIDAD	SEGURIDAD
<b>1. PROPIEDADES</b>										
ELECTROMAGNETICAS										
INMUNIDAD A RUIDO ELECTROMAGNETICO							●	●	●	
NO EXISTE RADIACION ELECTROMAGNETICA							●	●		●
NO CONDUCE ELECTRICIDAD	●		●		●	●		●		
NO EXISTE PROBLEMA DE TIERRA DE REFERENCIA			●		●	●		●		
NO GENERA CHISPA		●	●					●		
<b>2. CARACTERISTICAS FISICAS</b>										
ESPACIO REDUCIDO MUY LIGERA		●						●		
CONVIVENCIA CON CABLES DE ENERGIA		●						●		
CONVIVENCIA CON EQUIPOS EXPLOSIVOS		●	●		●			●		
<b>3. CAPACIDAD Y FUNCIONAMIENTO</b>										
ATEMUACION INDEPENDIENTE A LA TASA DE MODULACION				●			●	●		
CAPASIDAD ALTA DE TRANSMISION DE INFORMACION	●			●			●	●		
SE PUEDE UTILIZAR COMO MEDIO DE COMUNICACION Y SENSOR			●				●	●		
UTILIZA UN ESPECTRO DE FRECUENCIA REDUCIDO							●	●		
NO EXISTE DISFONIA							●	●		

TABLA 2  
TIPOS DE FIBRAS OPTICAS PARA TELECOMUNICACIONES

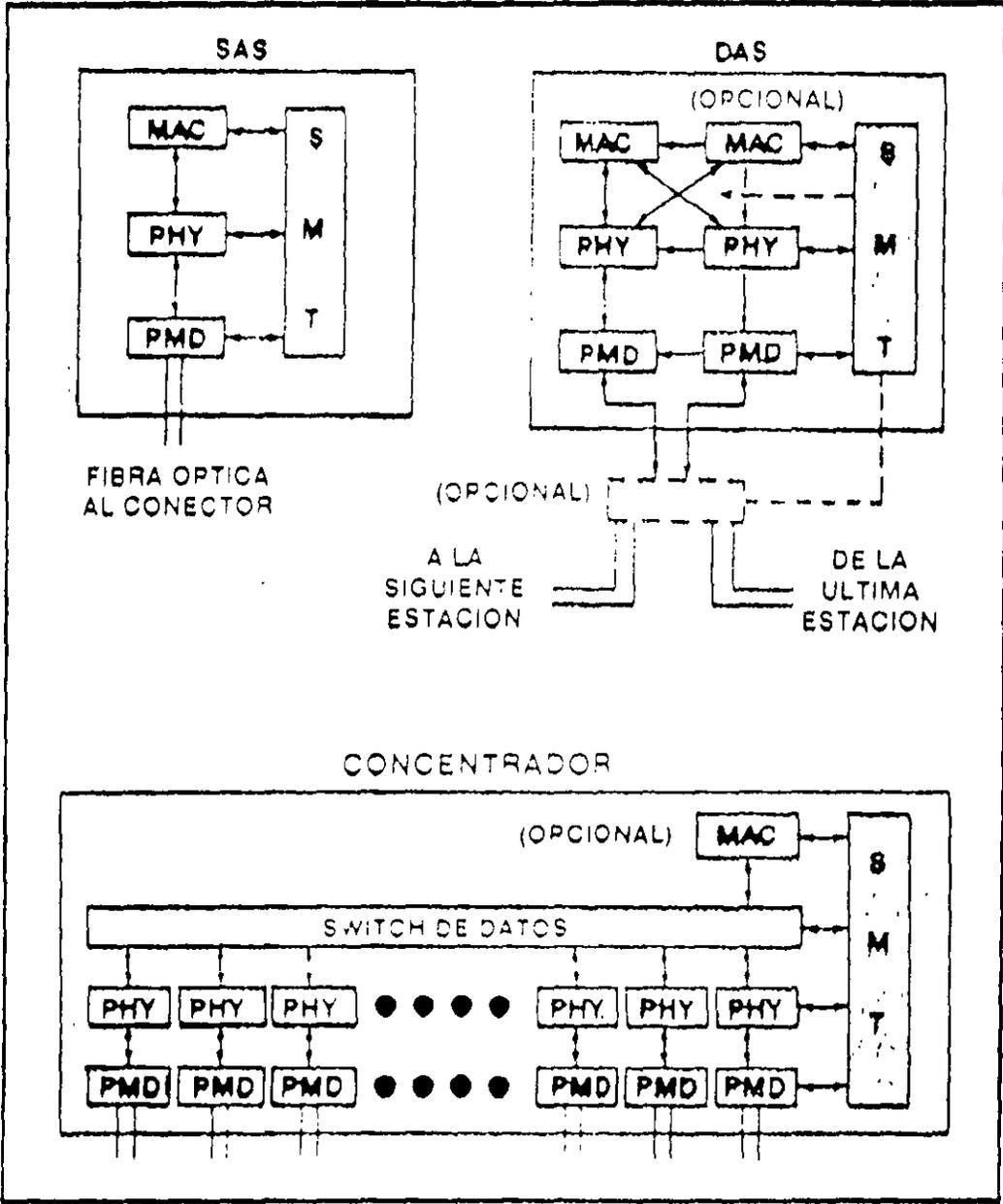
	NUCLEO	NUCLEO / REVESTIMIENTO (MICRAS)
UNIMODO	ESTANDAR (VIDRIO)	9/125
MULTIMODO	ESTANDAR (VIDRIO)	50/125
		62.5/125
		85/125
		100/140
	GRUESO (PLASTICO)	200/250 1000/1040

**TABLA 3**  
**CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DE LA RED**  
**CON FIBRAS OPTICAS**

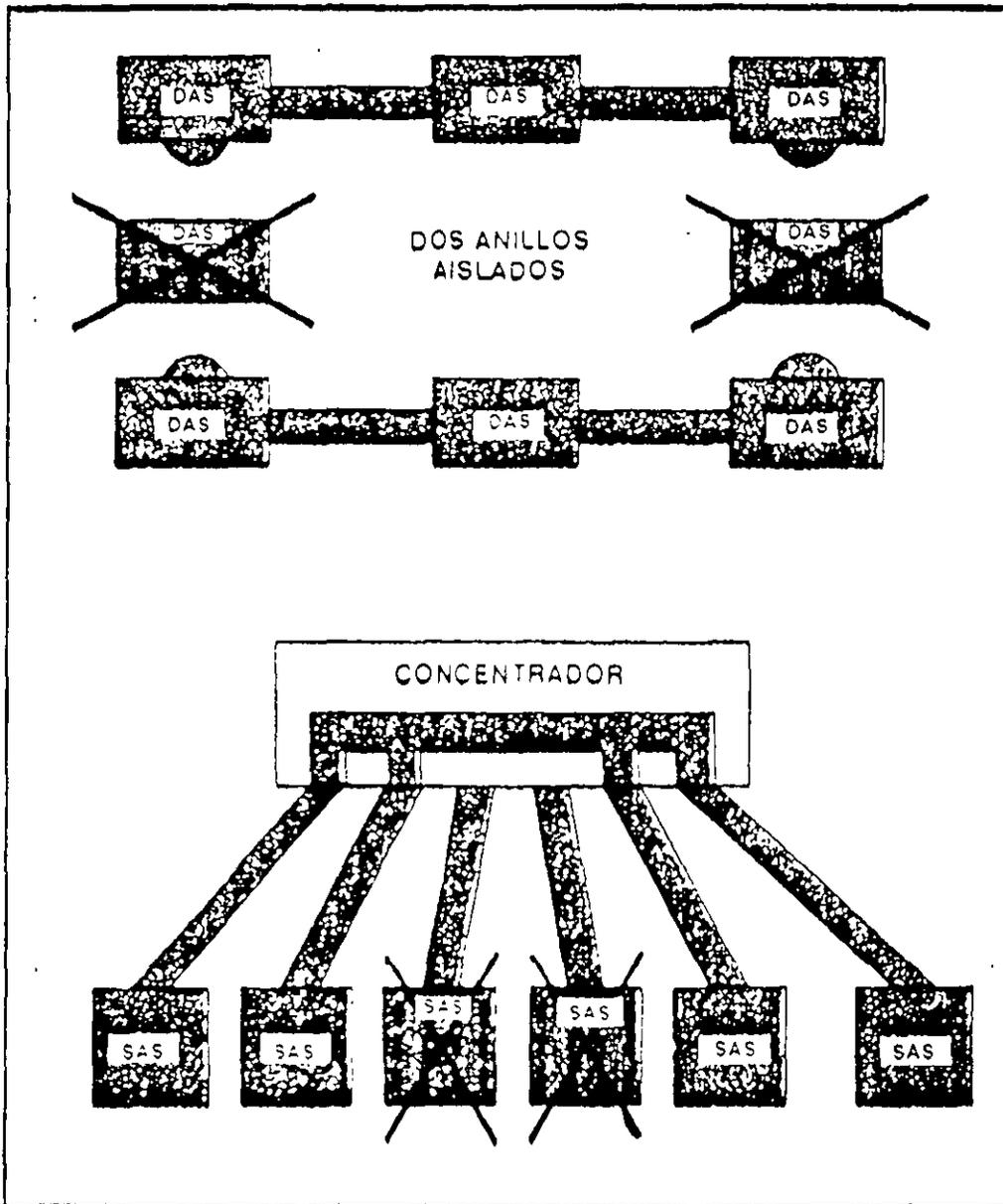
FUENTES		DETECTORES		FIBRAS	
LED	LASER	PIN	APD	NUCLEO GRUESO	NUCLEO DELGADO
COSTO REDUCIDO	MAYOR ANCHO DE BANDA	COSTO REDUCIDO	MEJOR SENSIBILIDAD DEL DETECTOR	FACIL DE EMPALMAR Y CONECTORIZAR	MAYOR ANCHO DE BANDA
ACOPLAMIENTO SENCILLO	MAYOR ACOPLAMIENTO DE POTENCIA	ACOPLAMIENTO SENCILLO			
MAYOR TIEMPO DE VIDA		MAYOR ESTABILIDAD			
MAYOR ESTABILIDAD					

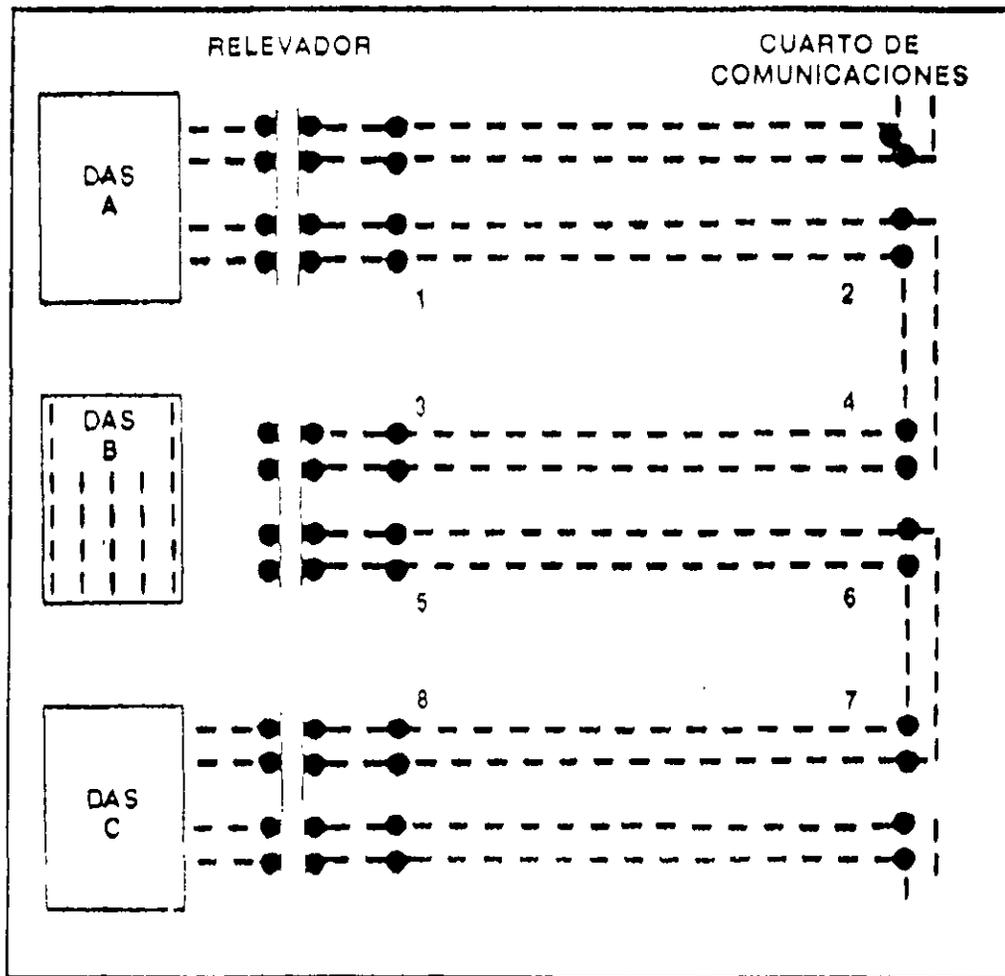


TOPOLOGIA FDDI

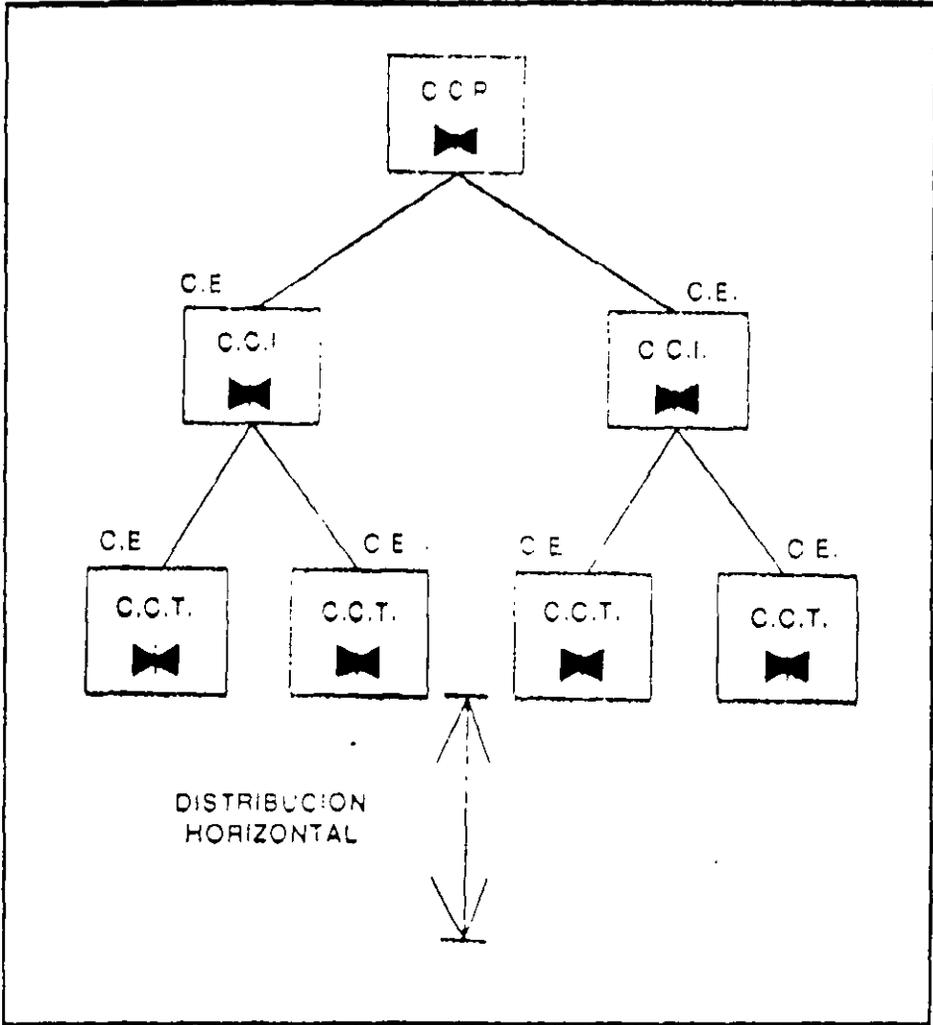


TIPOS DE ESTACIONES PARA FDDI

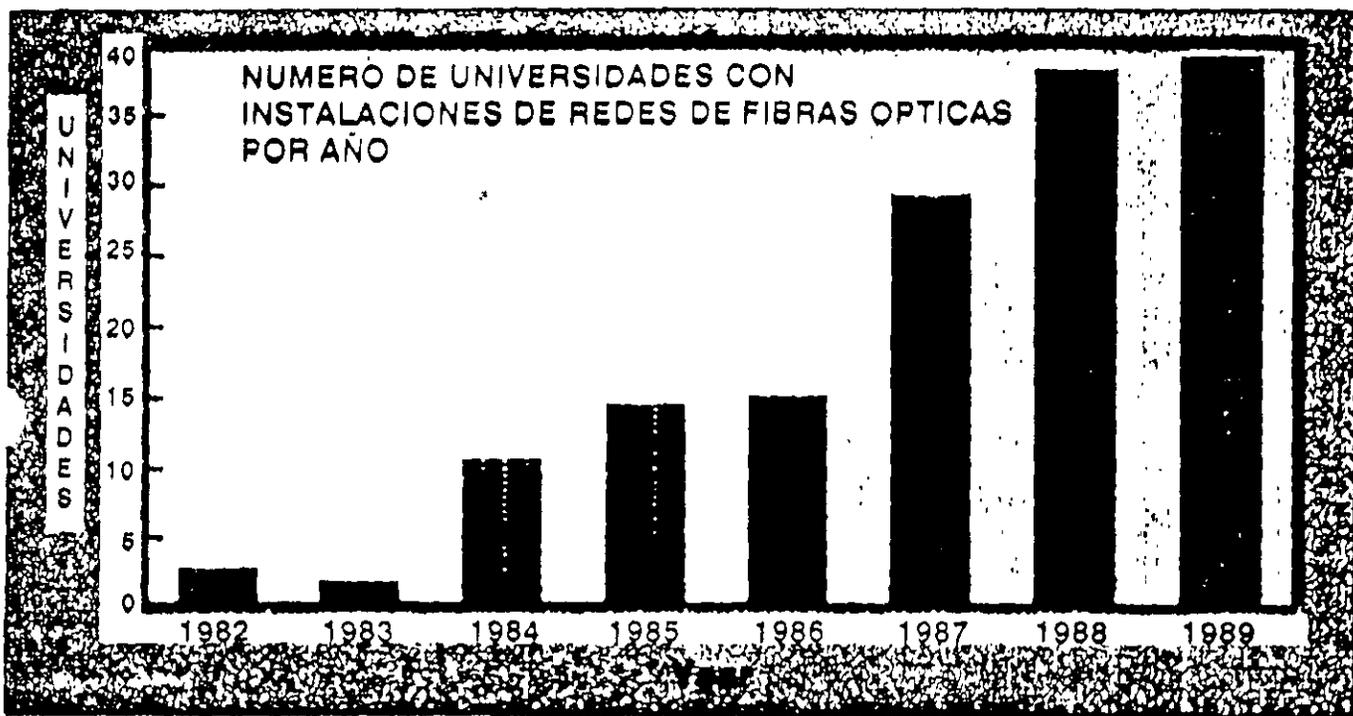




USO DE LA DERIVACION OPTICA CON  
DAS EN LA ESTRUCTURA DE CABLEADO



ESTANDAR AMERICANO PARA  
CABLEADO DE EDIFICIOS



EMPLEO EN LAS UNIVERSIDADES DE REDES  
DE FIBRA OPTICA PARA TRANSMISION DE DATOS

# CABLEADO TIPO TELEFONICO PARA LANS

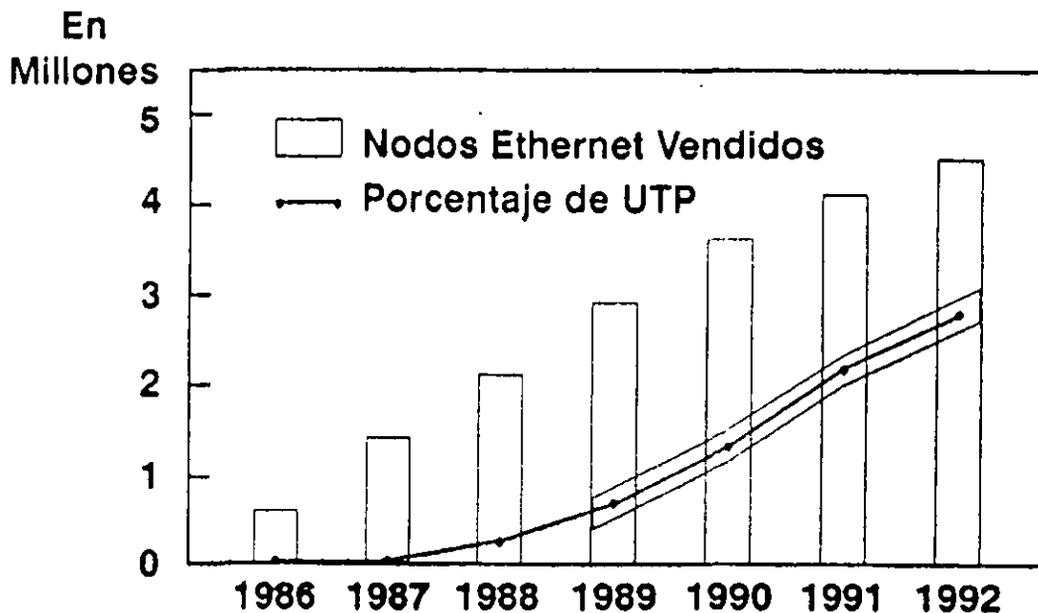
(UNSHIELDED TWISTED PAIR, UTP) A 10 MB/SEG

## INVENTADO POR SYNOPTICS EN XEROX PALO ALTO RESEARCH 1985

RAPIDA POPULARIDAD DEBIDO A QUE:

- FACILITA CONEXION DE LA RED
- FACILITA ADMINISTRACION DE LA RED
- AISLA LA DETECCION DE FALLAS
- FACILITA EL MANTENIMIENTO DE REDES

## DESARROLLO DE REDES ETHERNET UTP



Fuente: Dataquest

## **LA TECNOLOGIA UTP RESPONDE LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:**

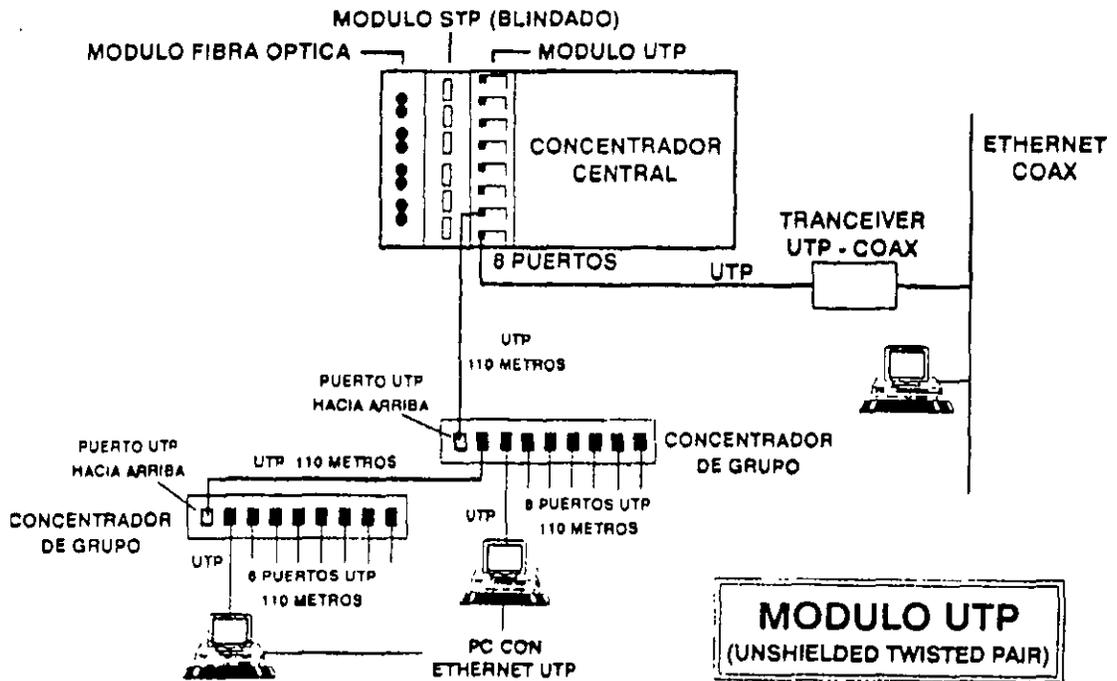
- ¿ QUE TAN CONFIABLES SON LAS REDES ACTUALES ?**
- ¿ EN CUANTO TIEMPO SE REESTABLECE UNA RED CAIDA?**
- ¿ QUE TANTA FLEXIBILIDAD SE TIENE EN ADICIONES Y MODIFICACIONES DE RED ?**
- ¿ CUANTOS DIFERENTES EQUIPOS, PROTOCOLOS Y APLICACIONES TENDRA LA RED EN LOS SIGUIENTES AÑOS ?**
- ¿ COMO SE MANTIENE UN SEGUIMIENTO DE LA OPERACION DE LOS EQUIPOS CONECTADOS EN RED ?**

# **LA RED COMO UTILERIA**

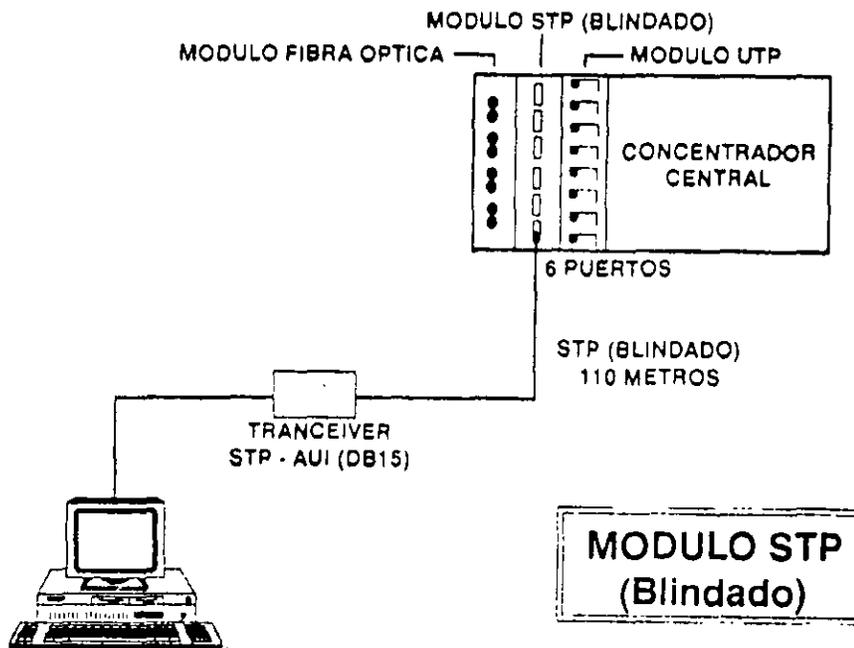
## **LA TECNOLOGIA UTP OFRECE**

- **MANEJO COMO SISTEMA ABIERTO MEDIANTE EL USO DE ESTANDARES**
- **GRAN CAPACIDAD DE ADAPTACION AL CAMBIO MEDIANTE SU MODULARIDAD Y FLEXIBILIDAD**
- **MINIMIZAR EL TIEMPO DE CAIDAS DE RED MEDIANTE MONITOREO DE OPERACION Y CONTROL ADMINISTRATIVO**
- **RECUPERACION RAPIDA DE CATASTROFES MEDIANTE REDUNDANCIA Y PRE-DIAGNOSTICOS**
- **BASE DE CRECIMIENTO EFICIENTE MEDIANTE UNA PLATAFORMA EXPANDIBLE DE HARDWARE CUMPLIENDO CON ESTANDARES ESTABLECIDOS**

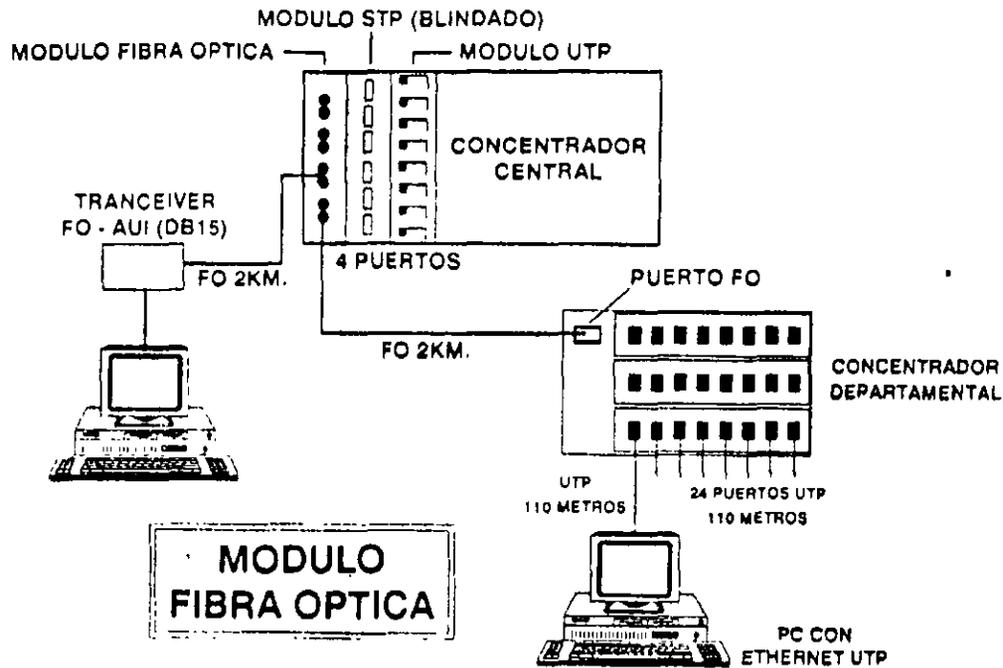
# TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



# TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



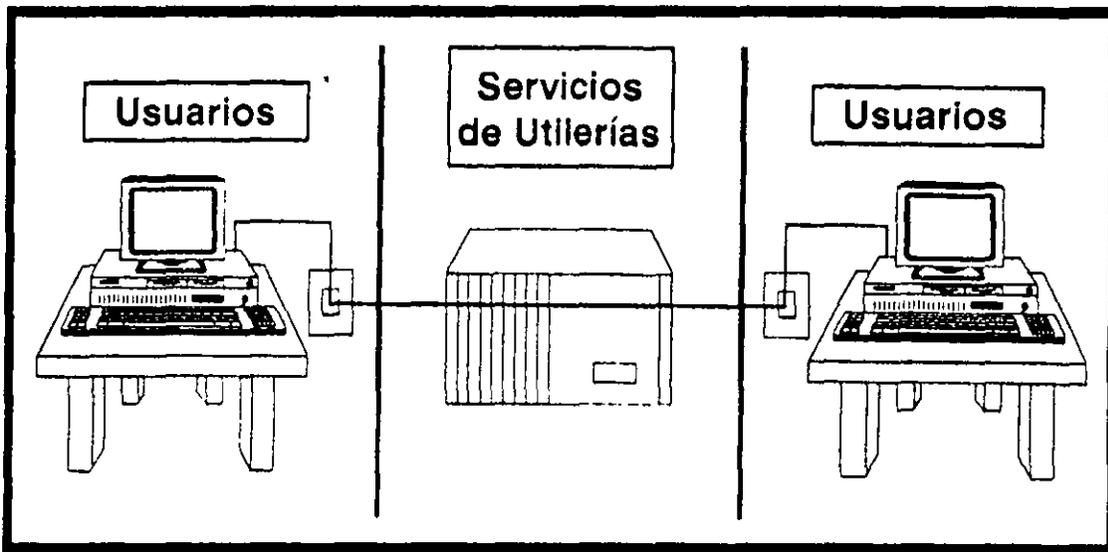
# TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



## PRINCIPALES VENTAJAS DEL CABLEADO TELEFONICO

- SEGURIDAD
- FLEXIBILIDAD
- MODULARIDAD
- ADMINISTRACION

# EL CONCEPTO DE RED COMO SERVICIOS DE UTILERIAS



# ESTANDARES Y TENDENCIAS DE LAS COMUNICACIONES EN EL MARCO DE LA IEEE

**Ing. Gerardo Chávez Díaz**

**IEEE Sección México.**



IEEE

# NATURALEZA Y CARACTERISTICAS DE LOS ESTANDARES IEEE

- Los estándares benefician a los usuarios de comunicaciones y computación.
- Requieren de gran compromiso por los fabricantes de tecnología.
- Competencia en el mercado basada en la calidad y servicios de valor agregado, más que en "Monopolios Tecnológicos".
- Permiten conciliar los intereses particulares en beneficios universales para la coexistencia de antiguas y nuevas tecnologías en el mercado de comunicaciones y computación.



# ORGANIZACIONES QUE RIGEN ESTANDARES A NIVEL INTERNACIONAL

- ANSI (EUA)
- AFNOR (Francia)
- BSI (Reino Unido)
- CSA (Canadá)
- ECMA (Europa)
- EIA (EUA)
- IEEE (EUA)
- ISO (Internacional)
- CCITT (Internacional)
- NCS (EUA)
- NIST (EUA)
- DOD (EUA)



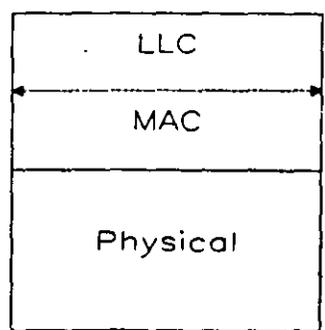
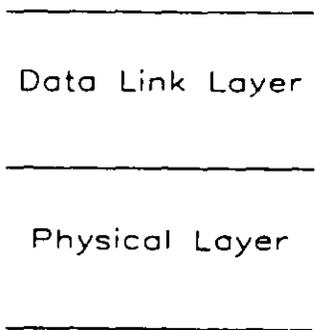
# CARACTERISTICAS DEL IEEE

- Fundada en 1884
- La más grande organización de profesionales en ingeniería a nivel mundial.
- Gran impacto en el mercado por los trabajos de estandarización en redes locales (LAN's).
- Adicionalmente incluyen estándares en componentes electrónicos, conectores de comunicaciones y otros dispositivos afines.
- Los estándares IEEE están basados en el modelo OSI desarrollado originalmente por el CCITT y adoptado por la ISO.



ISO/OSI

IEEE 802



IEEE

# CARACTERISTICAS DEL COMITE IEEE 802

- Ofrecer estándares operativos para la comunicación de las Redes Locales (LAN's) y Metropolitanas (MAN's).
- Están orientados a la capa física y de enlace definidos por el modelo OSI.
- Familia de estándares IEEE 802.X:
  - 802. 1- Relación de los estándares IEEE y su interacción con el modelo OSI de la ISO; interconectividad y administración de Redes .
  - 802. 2- Control lógico del enlace (LLC).
  - 802. 3- Red de topología "BUS" con el método de acceso (CSMA/CD) (1975-1983, Primera edición 1985).



802. 4- Red de topología "BUS" con el método de acceso TOKEN PASSING (1983, Primera edición 1985).

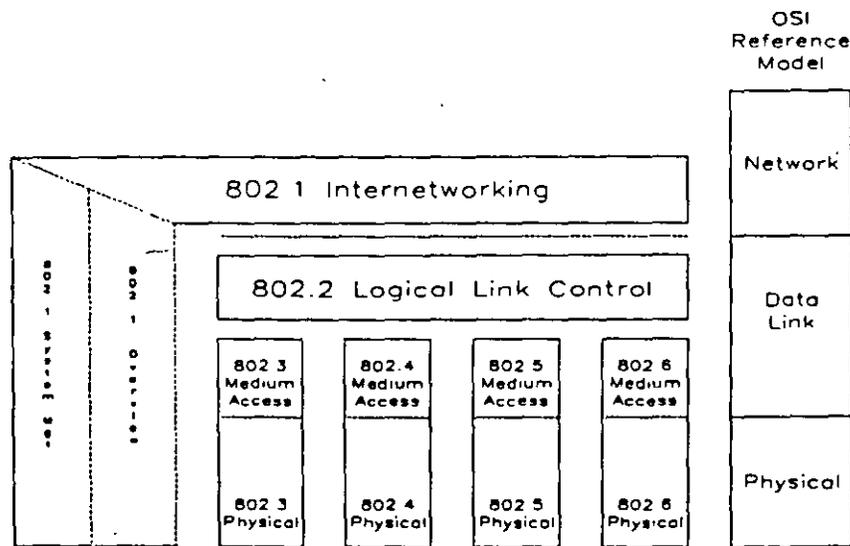
802. 5- Red de topología "ANILLO" con el método de acceso TOKEN PASSING (1969, Primera edición 1985).

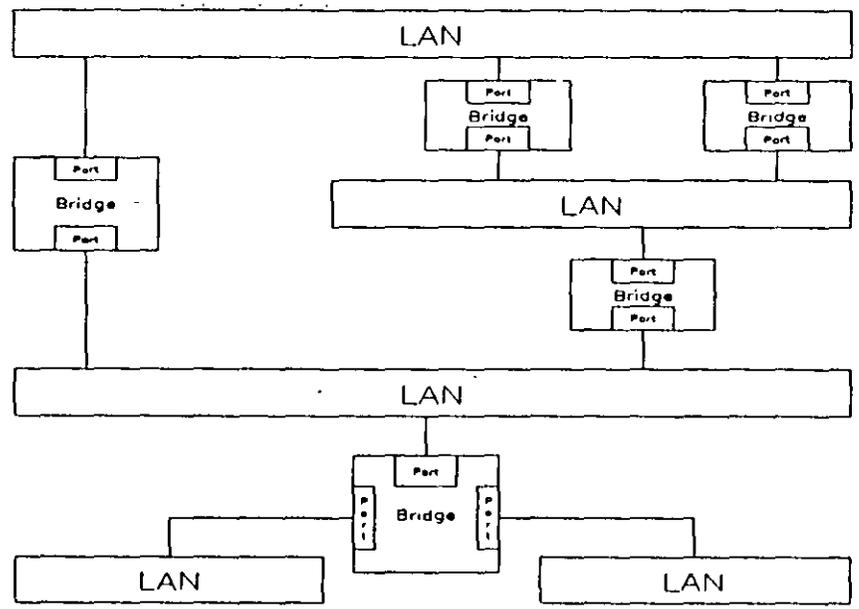
802. 6- Red de área metropolitana (MAN) basada en la topología DQDB (Nov. 1987, Primera edición 1987).

802.11- Redes inalámbricas (WIRE LESS-LAN's)  
(Estándar en proceso de definición-Julio 1994).



IEEE



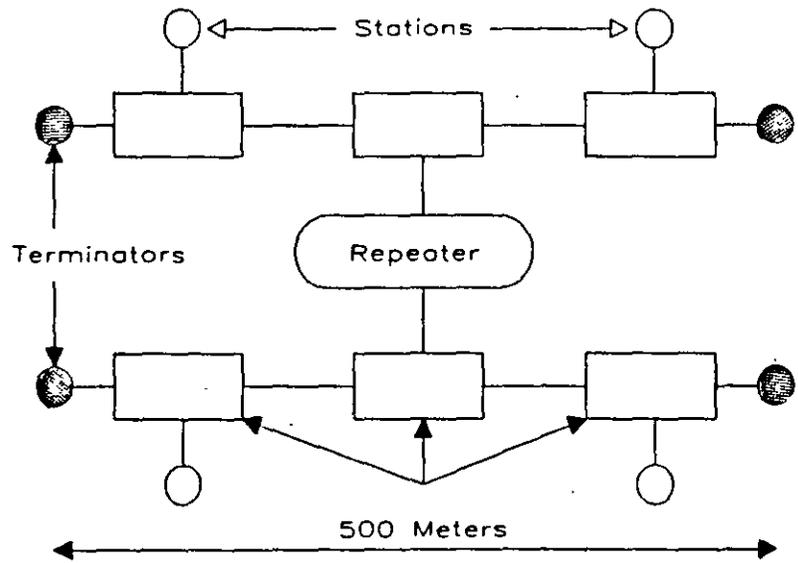


## **ANSI/IEEE 802.3 - CSMA/CD**

- El estándar 802.3 adoptado en 1985 está basado en las especificaciones de la Versión Ethernet II.
- En 1988 se publicaron los siguientes complementos:
  - 802.3a - 10 Base 2
  - 802.3b - 10 Broad 36
  - 802.3c - Repetidor Ethernet 10 Mbps
  - 802.3e - 10 Base 5
- En 1990: 10 Base T (Cable UTP Cat. 1,2,3).



IEEE



- En 1992: Fast Ethernet a 100 Mbps.

Existen actualmente 2 propuestas en evaluación :

a). Eliminar el soporte a la capa MAC (100 Base -VG) control de tráfico vía "HUBS".

Apoyado por : HP, ATT, U-B, WELLFLEET, PROTEON, COMITE IEEE 802.12

(Cable UTP categoría 5, 4 pares).

b). Manejar el soporte a la capa MAC/CSMA/CD.

-Aumento de velocidad de 10 - 100 Mbps basado en el esquema de capa física de la ANSI/FDDI.

-Apoyado por: GRAND JUNCTION NETWORKS, SYNOPTICS, 3 COM, SUN MICROSYSTEMS, entre otros, COMITE IEEE 802.14

(Cable UTP, categoría 3,2 pares).



IEEE

# ESTANDARES PARA REDES METROPOLITANAS (MAN's)

## - IEEE 802.6

Basado en topología DQDB Desarrollado originalmente por TELECOM Australia. 1987,  
velocidad de transmisión = 300 Mbps  
(150 Mbps por cada BUS).

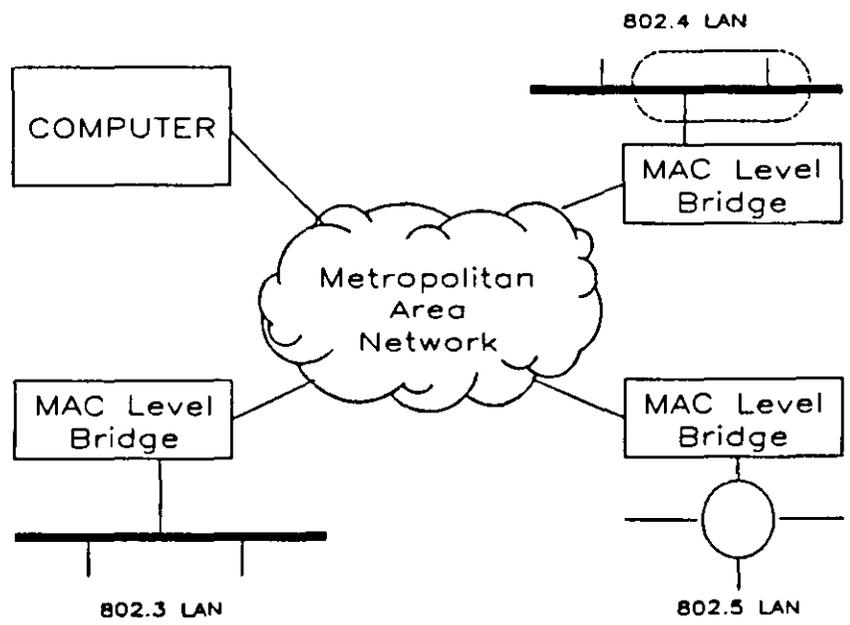
## - ANSI X 3T9.5 - FDDI

Doble anillo bajo el método TOKEN PASSING a 100 Mbps  
basado en el estándar IEEE 802.5

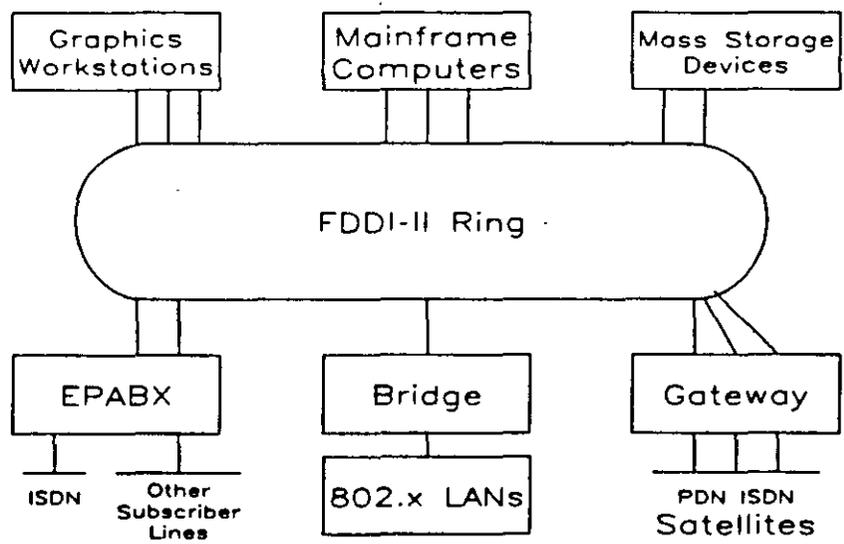
## - FDDI - II

Transmisión en el tiempo real de voz digitalizada y video de  
"Barrido Rápido".





IEEE



IEEE

# IEEE 802.11 - REDES INALAMBRICAS

- Por definir frecuencias de operación, velocidad de transmisión y máximo alcance.
- Seguridad en la transmisión. Datos encriptados.
- Interferencia de señal. Administración del espectro de frecuencias.
- Transparencia. Comunicación con los protocolos estandarizados vía "Puentes".
- Liberación del estándar en Julio 1994.



IEEE

## CONCLUSIONES

- Los estándares de Redes Ethernet y Token Ring predominarán en el mercado.
- Mayor énfasis en la comunicación de Redes MAN's y WAN's en los próximos años.
- Compatibilidad y transparencia de esquemas locales de alta velocidad (FDDI - CDDI), con Redes WAN's basadas en FRAME RELAY, ATM y SDH.
- Desarrollo de Redes WAN's, bajo el concepto de comunicaciones personales móviles e inalámbricas.



**Table 2-1 (continued)  
OSI Intra-Layer Standards**

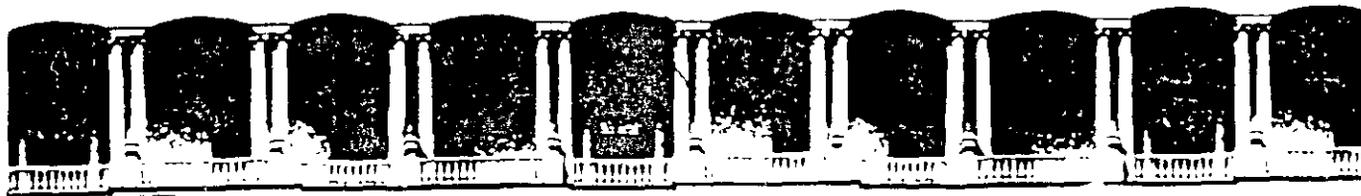
Layer	Standard Name	Number
Presentation	Connection-Oriented Presentation Protocol	ISO 8823
	Connectionless Protocol	ISO 9576
Session	Connection-Oriented Session Protocol	ISO 8327
	Connectionless Protocol	ISO 9548
Transport	Connection-Oriented Transport Protocol	ISO 8073
	Connectionless Protocol	ISO 8602
Network	Connectionless Protocol	ISO 8473
	X.25	ISO 8208
	End System to Intermediate System Exchange Protocol	ISO 9542
	Proposal on how to Use ISDN in OSI and OSI in ISDN	ISO 9574
Data Link	Logical Link Control	IEEE 802.2, ISO 8802/2
	Media Access Control	
	CSMA/CD	IEEE 802.3, ISO 8802/3
	Token Bus	IEEE 802.4, ISO 8802/4
	Token Ring	IEEE 802.5, ISO 8802/5
	Fiber Distributed Data Interface	ISO 9314
Physical	CSMA/CD	IEEE 802.3, ISO 8802/3
	Token Bus	IEEE 802.4, ISO 8802/4
	Token Ring	IEEE 802.5, ISO 8802/5
	Fiber Distributed Data Interface	ISO 9314
	Slotted Ring	ISO 8802/7
OSI Model-Related	Application Layer Structure	ISO 9545
	Procedures for OSI Registration Authorities	ISO 9834
	Security Architecture	ISO 7498-2
	Naming and Addressing Management Framework	ISO 7498-3 ISO 7498-4



**Table 2-1  
OSI Intra-Layer Standards**

Layer	Standard Name	Number
Application	Office Document Architecture (ODA)	ISO 8613
	File Transfer, Access, and Management (FTAM)	ISO 8571
	Virtual Terminal	ISO 9040
	Network Management	ISO 9595/96
	Manufacturing Message Specification	ISO 9506
	Distributed Transaction Processing	ISO 10026
	Document Filing and Retrieval	ISC 18N 1264/5
	Remote Database Access Protocol	ISO 9576
	Job Transfer & Manipulation	ISO 8832/33
	Document Transfer, Access, and Manipulation Protocol	CCITT T.431/433
	The Directory	CCITT X.500, ISO 9594
	Message Handling Service	CCITT X.400, ISO 10020/21
	Common Service Elements	
	Association Control Service Elements (ACSE)	ISO 8649/50
	Reliable Transfer Service Elements (RTSE)	ISO 9066
Remote Operations Service Elements (ROSE)	ISO 9072	





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**RECEPTORES ÓPTICOS**

**CONFERENCISTA  
M. en C. ROBERTO LINARES  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

## "RECEPTORES OPTICOS"

EN UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS.

RECEPTOR.- EXTRAE LA INFORMACION DESDE LA PORTADORA OPTICA QUE INCIDE EN EL DETECTOR.

SISTEMA DIGITAL.- EL RECEPTOR PRODUCE UNA SECUENCIA DE PULSOS ELECTRICOS (UNOS Y CEROS) QUE SON UNA REPRODUCCION FIEL DE LA INFORMACION DIGITAL QUE EXCITA LA FUENTE DE LUZ DEL TRANSMISOR.

SISTEMA ANALOGICO.- EL RECEPTOR AMPLIFICA LA SALIDA DEL DETECTOR Y DEMODULA LA SEÑAL AMPLIFICADA PARA - OBTENER LA INFORMACION.

EN ESTOS SISTEMAS EL "RECEPTOR" ES EL BLOQUE MAS "CRITICO" YA QUE ESTE DETERMINA TODA UNA SERIE DE PARAMETROS DEL SISTEMA TALES COMO:

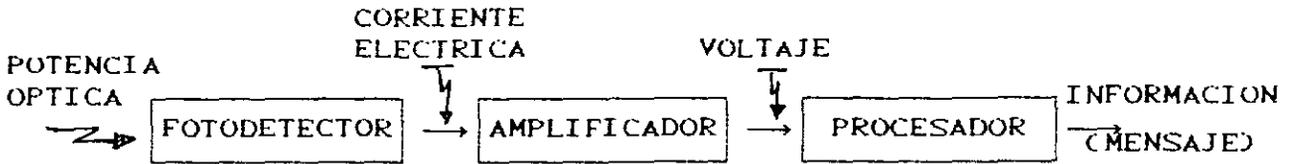
SENSIBILIDAD

INTERVALO DINAMICO

VELOCIDAD DE TRANSMISION

ESTABILIDAD

CONFIABILIDAD



FOTODETECTOR.- CONVIERTE LA POTENCIA OPTICA A POTENCIA ELECTRICA LA POTENCIA OPTICA ES UNA CANTIDAD EN BANDA DE BASE (LAS VARIACIONES SON DE ACUERDO A LA AMPLITUD Y NO CON RESPECTO A LA FASE.

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODETECTOR ES MUY PEQUEÑA (NANOAMPERS).

AMPLIFICADOR.- ES DE BAJO NIVEL DE RUIDO SE DISEÑA ESPECIALMENTE PARA FOTODETECTORES OPTICOS

PROCESADOR.- LA SALIDA DEL AMPLIFICADOR SE PROCESA PARA EXTRAER LA INFORMACION.

### SISTEMAS ANALOGOS



SEÑAL OPTICA DE ENTRADA  $F_{OPTICA}(t, m(t))$

$m(t)$  - MENSAJE ANALOGICO (PORTADGRES)

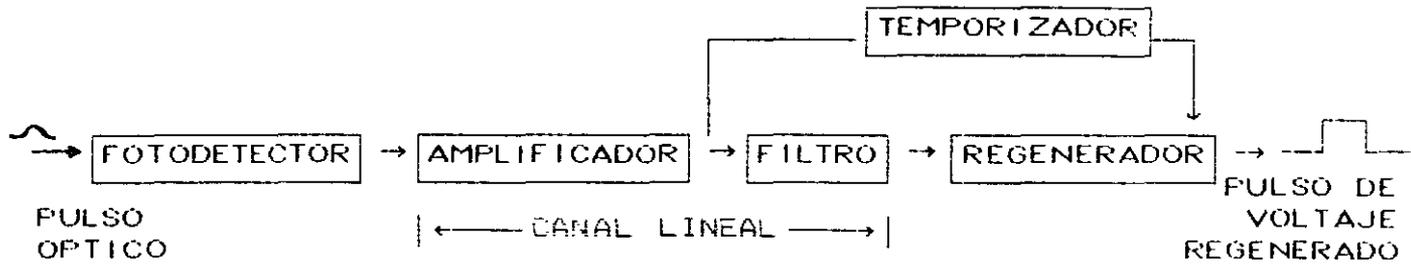
PARA UNA SIMPLE INTENSIDAD DE MODULACION

$$F_{OPTICA}(t, m(t)) = F_o [1 + \gamma m(t)]$$

$$\gamma \leq 1$$

$|m(t)| \leq 1$  - CONDICION QUE FIJA EL LIMITE SUPERIOR DE LA INTENSIDAD A LA CUAL SE PUEDE MODULAR LA PORTADORA.

## SISTEMAS DIGITALES



LA SEÑAL QUE INCIDE EN EL FOTODETECTOR ES UNA SECUENCIA DE PULSOS OPTICOS

$$P_{\text{OPTICOS}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k n_p(t - kT)$$

$a_k$  - ES "CERO" O "UNO" - HAY O NO HAY PULSO

$n_p$  - ES LA FORMA DE UN SOLO PULSO.

$T$  - ES EL ESPACIAMIENTO ENTRE PULSO

LA SEÑAL DE SALIDA DEL FOTODETECTOR ES:

$$e_s(t) = R \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k n_p(t - kT)$$

$R = (A/W)$  RESPONSIVIDAD

LA SEÑAL DE SALIDA DEL CANAL LINEAL.

$$V_{\text{OUT}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h_{\text{OUT}}(t - kT)$$

$h_{\text{OUT}}$  FORMA DE UN SOLO PULSO EN LA SALIDA DEL CANAL LINEAL.

EN UN INTERVALO DEL PULSO " $T$ " LA SEÑAL  $V_{\text{OUT}}(t)$  SE COMPARA CON UN UMBRAL PARA DETERMINAR SI HAY PULSO O NO HAY PULSO

TAMBIEN SE PUEDE TENER CON SUBPORTADORA DE FASE.

$$P_{OPTICA}(\tau, m(t)) = P_c \left\{ 1 + \cos [\omega t + \gamma m(t)] \right\}$$

$\omega$  - FRECUENCIA INTERMEDIA

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODETECTOR ES

$$i(t) = R P_{OPTICA}(t)$$

R - RESPONSABILIDAD = (A/W)

LA CORRIENTE SE AMPLIFICA Y SE FILTRA

SI EL SISTEMA ES CON MODULACION SIMPLE - NO SE REQUIERE DEMODULACION YA QUE LA SENAL ESTA EN BANDA BASE

SI EL SISTEMA ES CON SUBPORTADORA DE FASE - EL DEMODULADOR PUEDE SER PLL O UN DISCRIMINADOR.

SU LIMITACION ES: LA RELACION SENAL A RUIDO  
LA NO LINEALIDAD

VENTAJAS: SIMPLICIDAD  
CAPACIDAD DE ANCHO DE BANDA

CRITERIO PRACTICO DE LA FIDELIDAD ES EL ERROR CUADRATICO MEDIO

EL VALOR PROMEDIO DEL CUADRADO DE LA DIFERENCIA DE LOS MENSAJES DE SALIDA Y ENTRADA

$$MSE = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [m(t) - \hat{m}(t)]^2 dt$$

TAMBIEN SE DEFINE: COMO UNA ESTADISTICA O PROMEDIO DE DEL CONJUNTO DE TODOS LOS POSIBLES MENSAJES Y DEGRADACIONES (RUIDO E INTERFERENCIA).

EL REGENERADOR.- COMPARA Y SE SINCRONIZA POR EL TEMPORIZADOR A LA VELOCIDAD DE LLEGADA DE LOS PULSOS.

IDEALMENTE.- CUANDO HAY PULSO (UNO),  $V_{out}(t)$  DEBERA EXCEDER SIEMPRE EL UMBRAL.

LA REALIDAD.- EL RUIDO E INTERFERENCIAS (DE PULSOS ADYACENTES O DE OTROS SISTEMAS) PUEDEN AUMENTAR O DISMINUIR LA SENAL IDEAL ( $V_{out}(t)$ ) CAUSANDO ERRORES.

EL CRITERIO DE FIDELIDAD: TASA DE ERROR (BER)

EL VALOR TIPICO PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES ES:  $<10^{-9}$

EL MINIMO NIVEL DE POTENCIA OPTICA (SENSIBILIDAD) QUE DEBE RECONOCER EL RECEPTOR LO DETERMINA:

EL RUIDO

LA TASA DE ERROR

LA INTEFERENCIA ENTRE SIMBOLOS

EN AUSENCIA DE LUZ.-NO FLUIRA CORRIENTE (DESPRECIANDO LA CORRIENTE DE OSCURIDAD)  
NO SE GENERAN PARES ELECTRON-HUECO.

SI HAY UN PULSO EN AUSENCIA DE LUZ

"HAY ERROR" LA PROBABILIDAD ES:

$$p(0) = e^{-NAV}$$

$$\text{Si } p(0) = 10^{-9} \Rightarrow NAV = 21$$

LA ENERGIA MINIMA DETECTABLE ES:

$$E = 21 h\nu$$

LA POTENCIA MINIMA DETECTABLE ES:

$$P_{MIN} = 10.5 h\nu B \quad \text{donde } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

SE LLAMA LIMITE CUANTICO.

## PREAMPLIFICADORES OPTICOS

LA CALIDAD DEL RECEPTOR DETERMINA TODA UNA SERIE DE PARAMETROS IMPORTANTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS.

SENSIBILIDAD  
INTERVALO DINAMICO  
VELOCIDAD DE TRANSMISION  
TASA DE ERROR

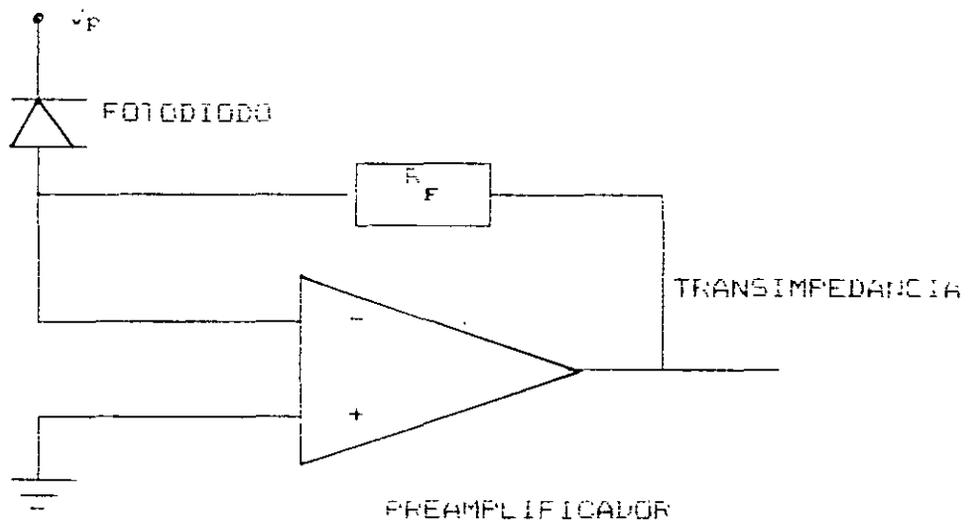
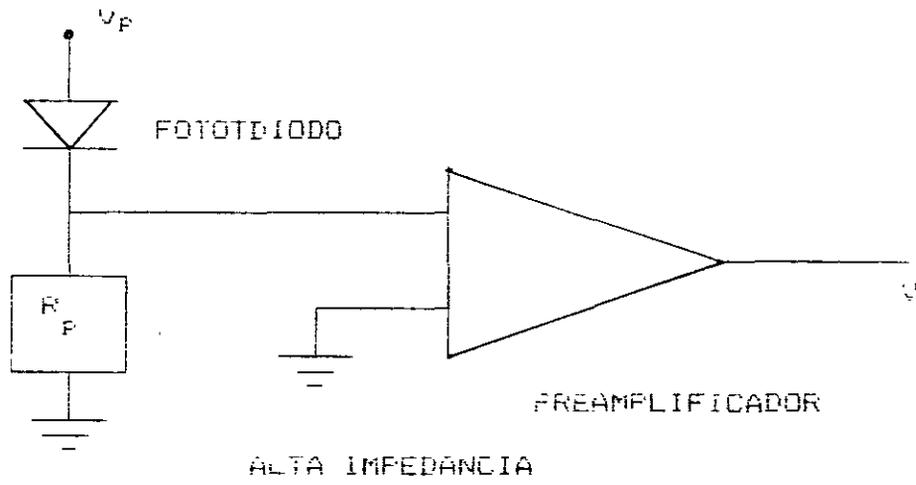
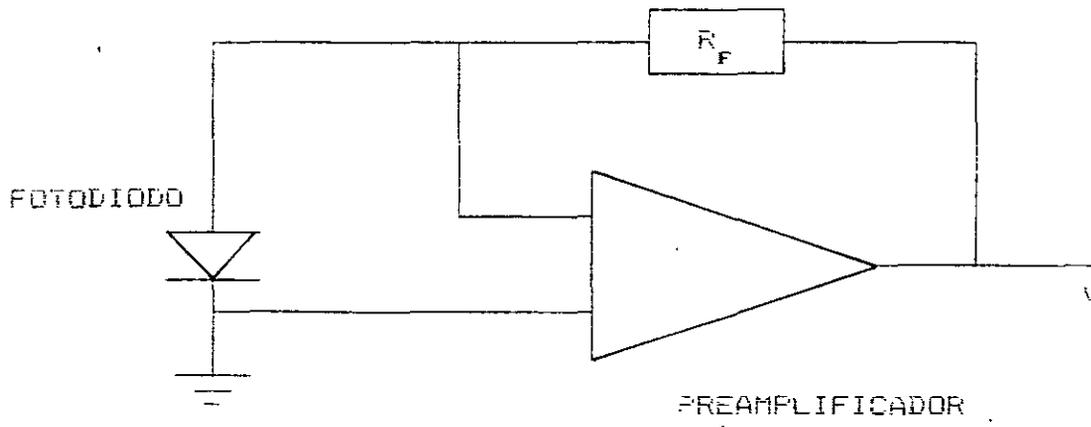
EL PREAMPLIFICADOR ES EL BLOQUE MAS CRITICO DEL RECEPTOR.

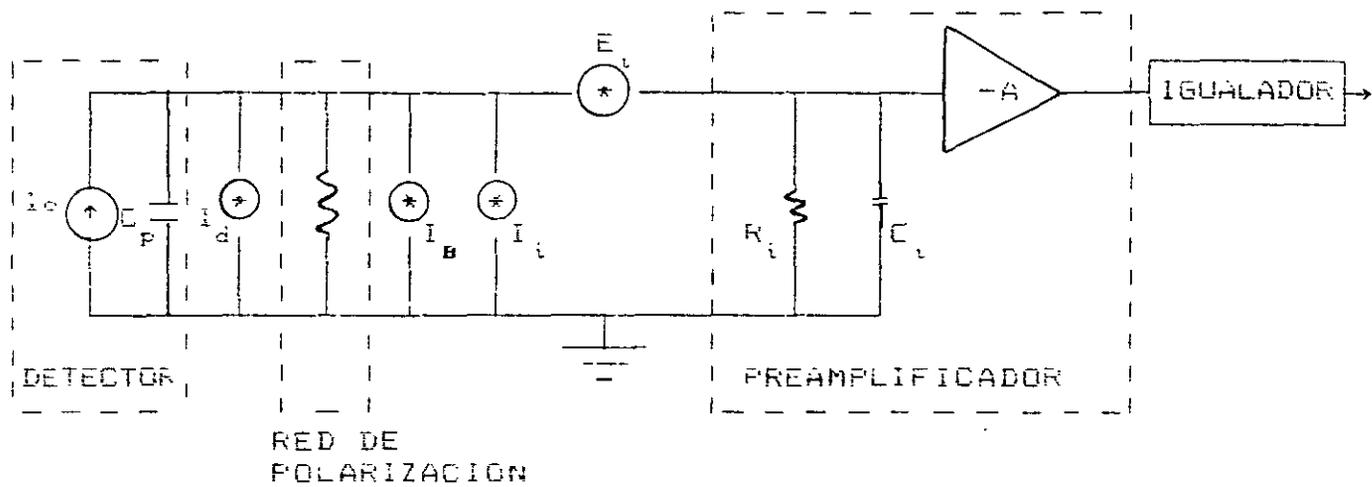
SUS CARACTERISITICAS IMPORTANTES SON:

SENSIBILIDAD  
INTERVALO DINAMICO  
ANCHO DE BANDA  
FORMA DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

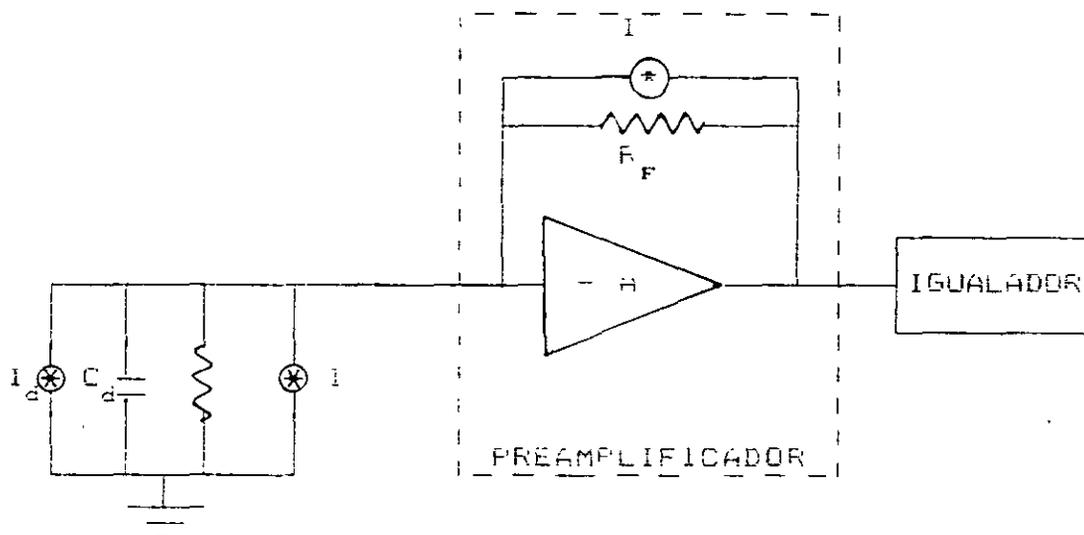
LAS CONFIGURACIONES COMUNMENTE USADAS EN LOS PREMPLIFICADORES OPTICOS SON:

ALTA IMPEDANCIA  
TRANSIMPEDANCIA.





PREAMPLIFICADOR OPTICO DE ALTA IMPEDANCIA



PREAMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA

LA ELECCION DE LA CONFIGURACION SE DA POR:

- 1.- SENSIBILIDAD (RUIDO)
- 2.- INTERVALO DINAMICO

EL RUIDO LO DETERMINA LA ETAPA DE ENTRADA Y LA RED DE RETROALIMENTACION.

LOS ELEMENTOS QUE PUEDEN USARSE EN LA ETAPA DE ENTRADA SON:

- BJT
- JFET
- MOSFET
- GAA<sub>s</sub>FET

LOS JFET - SE UTILIZA PARA VELOCIDADES MENORES DE 25 Mbits/s

LA CONFIGURACION DE TRANSIMPEDANCIA

TIENE MAYORES VENTAJAS CON RESPECTO A LA DE ALTA IMP.

ANCHO DE BANDA

INTERVALO DINAMICO

RESPUESTA PLANA DE LA CARACTERISTICA AMPLITUD-FRECUENCIA

LA IGUALACION ES MENOS COMPLICADA

LOS ELEMENTOS MAS UTILIZADOS SON:

BST Y GAA<sub>s</sub>FET.

TIENEN COEFICIENTE DE GANANCIA BASTANTE GRANDE

FRECUENCIAS DE CORTE DE VARIOS GHZ.

## RUIDO

$$\langle \eta_{OUT}^2 \rangle = \frac{4kT \left[ 2\pi C_i \right] A^2 B^2}{\sqrt{3\beta_1}} = \frac{4kTB}{Y_{in-optima}} \left[ \text{Volts}^2 \right]$$

DONDE:

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/k Constante de Boltzman's.

$T =$  Temperatura (k) = 300 k para temperatura Ambiente.

$C_i =$  Capacitancia de Entrada.

$A =$  Ganancia de Transimpedancia.

$B =$  Ancho de Banda.

$$Y_{in-optima} = \frac{q I_{base}}{g} = \frac{\sqrt{3\beta_1}}{2\pi C_i B}$$

$$I_{colector-optima} = \frac{kT(2\pi C_i B)^{\beta_1}}{q \sqrt{3\beta_1}}$$

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  Conf. Carga del Electron.

$\beta_1 =$  Ganancia de Corriente de  $T_1$

———— SI SE UTILIZA COMO  $T_1$  UN JFET ————

EL RUIDO DE SALIDA DEL PREAMPLIFICADOR ES:

$$\eta_{out-rms} = \left[ \langle \eta_{out}^2 \rangle \right]^{1/2} = \left[ 2.5 \frac{B^3}{g_m} (2\pi C_i)^2 A^2 \right]^{1/2}$$

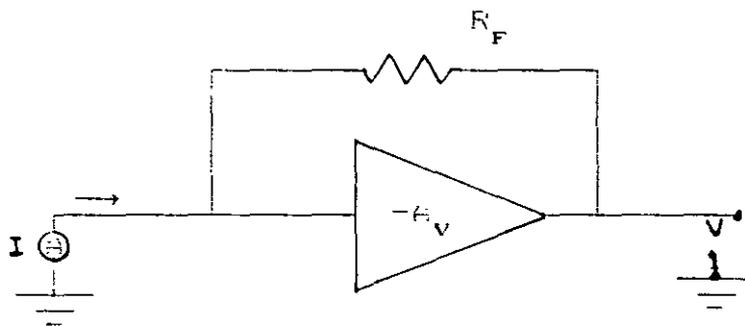
$g_m$  es la transconductancia del JFET.

## DISEÑO Y SIMULACION DE PREAMPLIFICADORES OPTICOS

EL DETECTOR OPTICO ES UN FOTODIODO

CONVIERTE  $\longrightarrow$  ENERGIA  $(P)$    $\longrightarrow$  CORRIENTE  $(I)$   
 OPTICA  $I = \eta P$

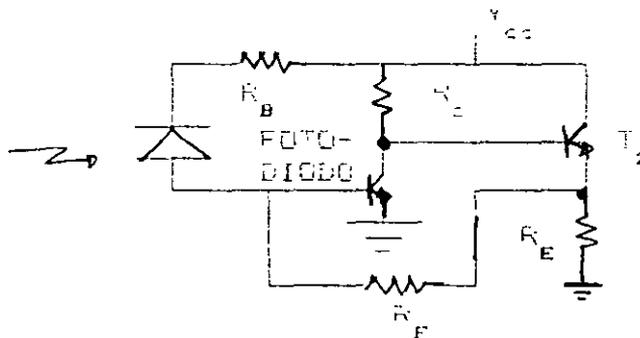
LA CORRIENTE  $\longrightarrow$  SE PROCESA  $\longrightarrow$  SE CONVIERTE  
 EN VOLTAJE PARA INTERPRETAR LA ENERGIA OPTICA:



TRANSIMPEDANCIA

LA GANANCIA DE TRANSIMPEDANCIA ES =  $\boxed{\frac{V}{I} = R_F}$

SI SE UTILIZA PARA EL AMPLIFICADOR DE VOLTAJE UN PAR  
 RETROALIMENTADO.



LA RESISTENCIA DE ENTRADA ES

$$R_i = \frac{R_F}{1 - A_V} \quad \text{Donde } A_V = \text{GANANCIA DE VOLTAJE DEL AMPLIFICADOR.}$$

LA CAPACITANCIA DE ENTRADA ES

$$C_i = C_D + C_P + C_{be} + [C_{bc} + C_f] (1 - A_V)$$

DONDE:

$C_D$  - CAPACITANCIA DEL FOTODIODO.

$C_P$  - CAPACITANCIA PARASITA.

$C_{be}$  - CAPACITANCIA BASE-EMISOR DE  $T_1$ .

$C_{bc}$  - CAPACITANCIA BASE-COLECTOR DE  $T_1$ .

$C_f$  - CAPACITANCIA DE RETROALIMENTACION.

$[C_f + C_{bc}] (1 - A_V)$  CAPACITANCIA MILLER.

EL ANCHO DE BANDA DEL PREAMPLIFICADOR ESTA LIMITADO POR:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_i C_i}$$

$$\text{SI } A_V \gg 1 \quad \Rightarrow \quad C_i \approx (C_{bc} + C_f) (1 - A_V)$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \left[ \frac{R_f}{1-A_V} \right] (C_{bc} + C_f) (1-A_V)} = \frac{1}{2\pi R_F (C_{bc} + C_f)}$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \left[ \frac{R_F}{1-A_V} \right] [C_D + C_P + C_{be} + (C_{bc} + C_f) (1-A_V)]}$$

## RUIDO

$$e_{out}^2 = \frac{4kT [2\pi C_i] A^2 B^2}{\sqrt{3\beta_1}} = \frac{4kTB}{Y_{in-optima}} \quad [\text{Volt}^2]$$

DONDE:

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K Constante de Boltzman's.

$T =$  Temperatura (K) = 300 K para temperatura Ambiente.

$C_i =$  Capacitancia de Entrada.

$A =$  Ganancia de Transimpedancia.

$B =$  Ancho de Banda.

$$Y_{in-optima} = \frac{kT}{q I_{base}} = \frac{\sqrt{3\beta_1}}{2\pi C_i B}$$

$$I_{colector-optimo} = \frac{kT (2\pi C_i B) \beta_1}{q \sqrt{3\beta_1}}$$

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  C. Carga del Electrón.

$\beta_1 =$  Ganancia de Corriente de  $T_1$

———— SI SE UTILIZA COMO  $T_1$  UN JFET ————

EL RUIDO DE SALIDA DEL PREAMPLIFICADOR ES:

$$V_{out-rms} = [e_{out}^2]^{1/2} = \left[ 1.6 \frac{E^3}{3gm} (2\pi C_i)^2 A^2 \right]^{1/2}$$

$gm$  es la transconductancia del JFET.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RECEPTORES OPTICOS PARA SISTEMAS DE  
TRANSMISION DIGITAL POR FIBRAS OPTICAS DE 140 MBITS/S

OBJETIVO:

DISEÑAR, CONSTRUIR Y CARACTERIZAR UN RECEPTOR OPTICO PARA  
SISTEMAS DE COMUNICACIONES OPTICAS DE LA CUARTA JERARQUIA  
DE TRANSMISION DIGITAL EN LA VENTANA DE 1300nm.

LOS MEDIOS PRINCIPALES PARA LOGRAR ESTE OBJETIVO SON:

- DOMINAR LOS METODOS DE MEDICION DE LOS PARAMETROS DE LOS COMPONENTES OPTICOS.
- SIMULACION POR COMPUTADORA PARA LA OPTIMIZACION DE DISEÑOS DE CIRCUITOS ELECTRONICOS.
- DISPONER DE UN PROTOTIPO DE LABORATORIO DEL PREAMPLIFICADOR OPTICO COMPATIBLE CON LA CONSTRUCCION HIBRIDA Y MONOLITICA.
- UTILIZACION DE LA TECNOLOGIA DE MONTAJE SUPERFICIAL.

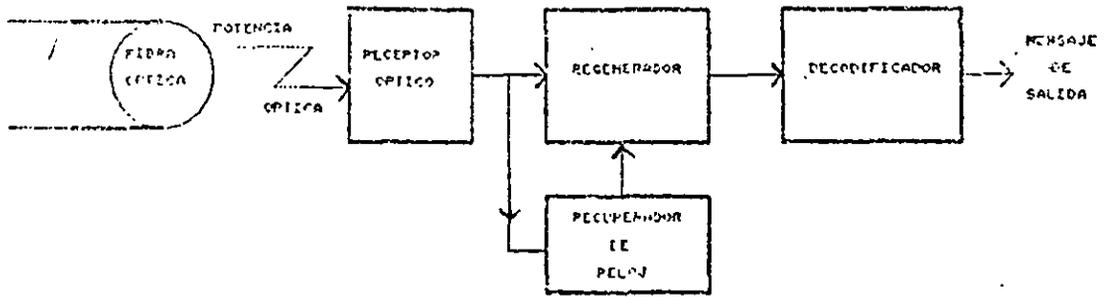
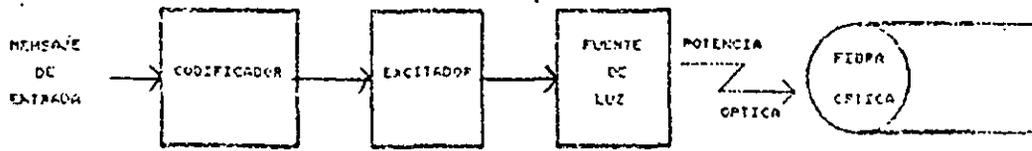
ANTECEDENTES:

EL RECEPTOR DESARROLLADO DEBE POSEER LAS CARACTERISTICAS ESENCIALES EN EL AMBITO DE LABORATORIO SIMILARES A LAS CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS COMERCIALES. PARA QUE CON UN PEQUEÑO DESARROLLO ADICIONAL, SOBRETUDO EN EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ALGUNOS COMPONENTES SE PUEDA LLEGAR A UN PROTOTIPO DE CAMPO O INDUSTRIAL.

LOS OBJETIVOS SE CUMPLIERON SATISFACTORIAMENTE.

PARA ESTO SE REALIZO LO SIGUIENTE:

- 1.-SE ANALIZO LAS CARACTERISTICAS PARTICULARES DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS, HACIENDO ENFASIS EN EL RECEPTOR.
- 2.-SE REALIZO UN ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE EN EL DISEÑO DE RECEPTORES PARA SISTEMAS DE TRANSMISION DIGITAL POR FIBRAS OPTICAS DE ALTAS VELOCIDADES. HACIENDO ENFASIS EN LOS PREAMPLIFICADORES OPTICOS Y EN LOS DISPOSITIVOS DE ENTRADA.
- 3.-SE DISEÑO EL RECEPTOR OPTICO Y SE SIMULO CON COMPUTADORA PARA OPTIMIZARLO. SE MIDIERON LOS PARAMETROS DEL FOTODETECTOR Y DE LOS COMPONENTES ACTIVOS UTILIZADOS.
- 4.-SE DISEÑARON, OPTIMIZARON Y CONSTRUYERON TRES VARIANTES DE PREAMPLIFICADORES OPTICOS COMPATIBLES CON LA CUARTA JERARQUIA DE TRANSMISION DIGITAL, CON EL FIN DE SELECCIONAR EL MEJOR.
- 5.-EL RECEPTOR OPTICO SE CONSTRUYO Y SE CARACTERIZO. EL PREAMPLIFICADOR SELECCIONADO SE CONSTRUYO CON COMPONENTES DE MONTAJE SUPERFICIAL. LA CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DEL RECEPTOR SE REALIZO BLOQUE POR BLOQUE. FINALMENTE SE ENSAMBLO TODO EL RECEPTOR Y SE CARACTERIZO.



EL RECEPTOR OPTICO ESTA CONSTITUIDO POR:

-UN FOTODETECTOR DE AVALANCHA.

-UN PREAMPLIFICADOR OPTICO.

-UN AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA.

-UN FILTRO PASA BAJOS TIPO THOMSON DE 5<sup>º</sup> ORDEN.

-UNA FUENTE DE POLARIZACION PARA EL FOTODETECTOR DE AVALANCHA CON CIRCUITO DE PROTECCION Y CONTROL.

EL PREAMPLIFICADOR ES EL BLOQUE MAS CRITICO DEL RECEPTOR. DEBIDO A QUE ESTE DETERMINA VARIOS PARAMETROS DE IMPORTANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS. DEBE DISEÑARSE ESTABLECIENDO UN COMPROMISO DE CRITERIOS QUE PUEDEN ESTAR EN CONTRAPOSICION. POR LO QUE SE REQUIERE DE UN PROCESO DE OPTIMIZACION. LOS CRITERIOS COMUNMENTE CONSIDERADOS EN EL DISEÑO DE PREAMPLIFICADORES OPTICOS SON: SENSIBILIDAD, INTERVALO DINAMICO, ANCHO DE BANDA, FORMA DE LA RESPUESTA AMPLITUD-FRECUENCIA Y FASE-FRECUENCIA.

EL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA TIENE COMO FUNCION COMPENSAR LAS VARIACIONES DEL NIVEL DE POTENCIA QUE INCIDE EN EL FOTODETECTOR. CON EL FIN DE MANTENER LA AMPLITUD CONSTANTE DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL RECEPTOR, PARA QUE FUNCIONEN LOS CIRCUITOS POSTERIORES AL RECEPTOR (CIRCUITO DE DECISION, DE EXTRACCION DE SINCRONIA O DEMODULADORES).

EL FILTRO PASA BAJOS TIPO THOMSON DE 5<sup>º</sup> ORDEN DETERMINA EN LO FUNDAMENTAL EL COMPORTAMIENTO DE AMPLITUD-FRECUENCIA Y FASE-FRECUENCIA DEL RECEPTOR. SE UTILIZA PARA OPTIMIZAR LA RELACION SEÑAL A RUIDO Y MINIMIZAR LA INTERFERENCIA ENTRE SIMBOLOS.

LA FUENTE DE POLARIZACION PARA EL FOTODETECTOR DE AVALANCHA CON CIRCUITO DE PROTECCION Y CONTROL ESTA FORMADA POR UN CONVERTIDOR DE DC/DC, CON PROTECCION DE SOBRE VOLTAJES PARA EL FOTODETECTOR Y CONTROLA EL VOLTAJE PARA COMPENSAR LAS VARIACIONES DE GANANCIA DEL APD, CAUSADAS POR LAS FLUCTUACIONES DE TEMPERATURA Y PARA INCREMENTAR EL INTERVALO DINAMICO DEL RECEPTOR.

## REQUISITOS MAS SOBRESALIENTES DEL RECEPTOR OPTICO:

-VELOCIDAD DE TRANSMISION: 139.264 Mbits/s

-CODIGO DE LINEA: 5B6B

-FRECUENCIA DE OPERACION: 167.116 MHz

-FORMATO DE SEÑAL: NRZ

-VENTANA DE TRANSMISION: 1300 nm

-TASA DE ERROR:  $10^{-9}$

-SENSIBILIDAD MAXIMA: -48 dBm

-SENSIBILIDAD MINIMA: -20 dBm

FOTODETECTOR: APD

-NIVEL DE LA SEÑAL DE SALIDA: 200 mVp-p

-INTERVALO DINAMICO DE LA SEÑAL DE SALIDA:  $\pm 1.5$  mVp-p

-IMPEDANCIA DE SALIDA: 100  $\Omega$

-ESTABILIDAD DINAMICA: LA RESPUESTA TRANSITORIA NO DEBE TENER SOBRETUROS

## CALCULO DE LA FOTOCORRIENTE DEL FOTODETECTOR DE AVALANCHA

EL FOTODETECTOR UTILIZADO EN EL DISEÑO ES UN APD DE GERMANIO DE FUJITSU TIPO FPD13R12JT SUS CARACTERISTICAS PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE PARA UNA GANANCIA DE DIEZ SON:

- DIAMETRO DEL AREA ACTIVA:  $100\mu\text{m}$
- VENTANA DE TRANSMISION ( $\lambda$ ):  $1300\text{ nm}$
- EFICIENCIA TIPICA: 70%
- FRECUENCIA DE CORTE TIPICA: 700 MHz PARA  $R_L = 50\ \Omega$
- VOLTAJE DE POLARIZACION: 25 V - 40 V
- FACTOR DE RUIDO DE EXCESO: 9
- VALOR DE  $X = 0.95$
- CORRIENTE DE OSCURIDAD:  $0.33\ \mu\text{A}$

EL CALCULO DE LA FOTOCORRIENTE SE REALIZA UTILIZANDO LA ECUACION (1.3) PARA LA SENSIBILIDAD EXIGIDA.

	MINIMA	MAXIMA	INTERVALO
SENSIBILIDAD			
(POTENCIA OPTICA			
PROMEDIO DETECTADA)	-48 dBm	-20 dBm	28 dB
GANANCIA DE CORRIENTE			
DEL APD	5 (13.79 dB)	30 (29.54 dB)	15.75 dB
FOTOCORRIENTE PROMEDIO	$0.475\ \mu\text{A}$	$52.3\ \mu\text{A}$	

El fotodetector esta acoplado a un tramo de fibra optica, el núcleo de la fibra es de 50  $\mu\text{m}$  y el primer recubrimiento óptico es de 125  $\mu\text{m}$ . La eficiencia del APD medida es  $\eta=0.535$  y su característica Ganancia-Voltaje de polarización experimental, medida en el laboratorio se muestra en la figura 3.1.

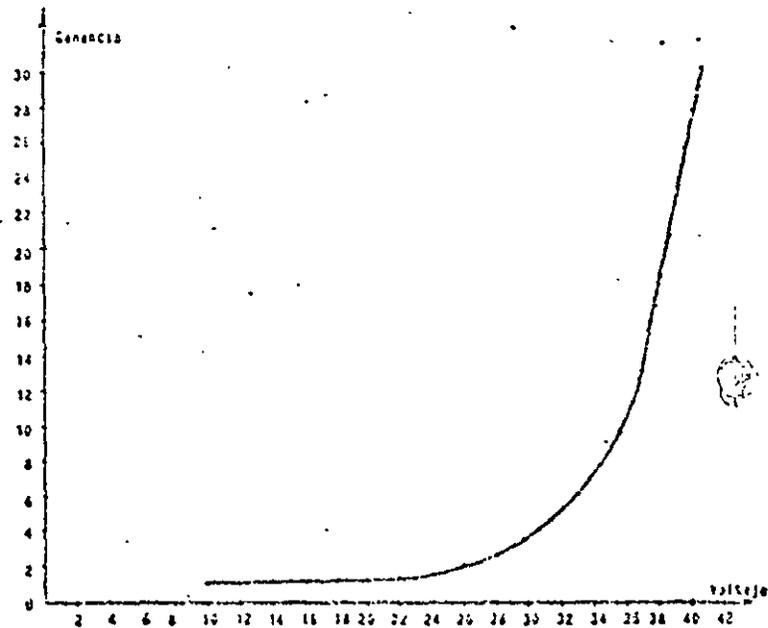


Fig. 3.1.-Característica experimental Ganancia-Voltaje de polarización del APD de Fujitsu FD13R12JT.

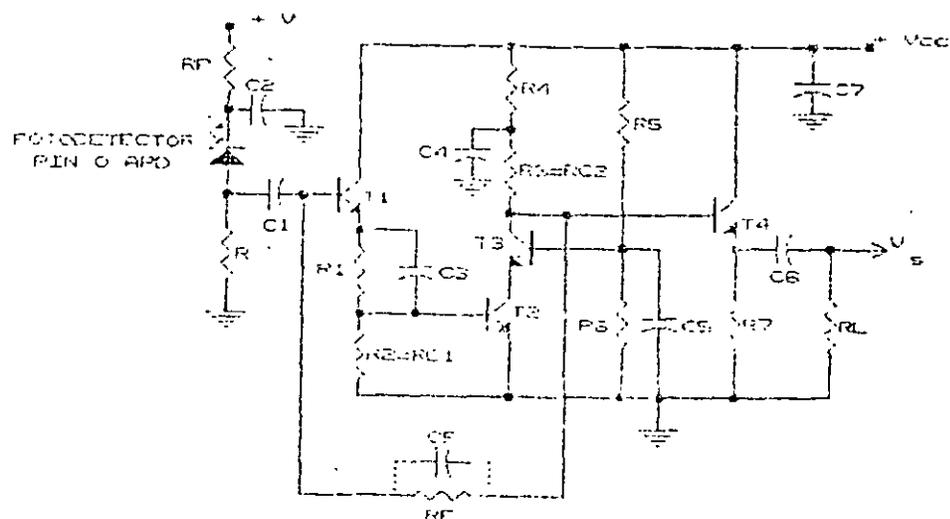


Fig. 3.2.-Circuito de configuración CC-cascode

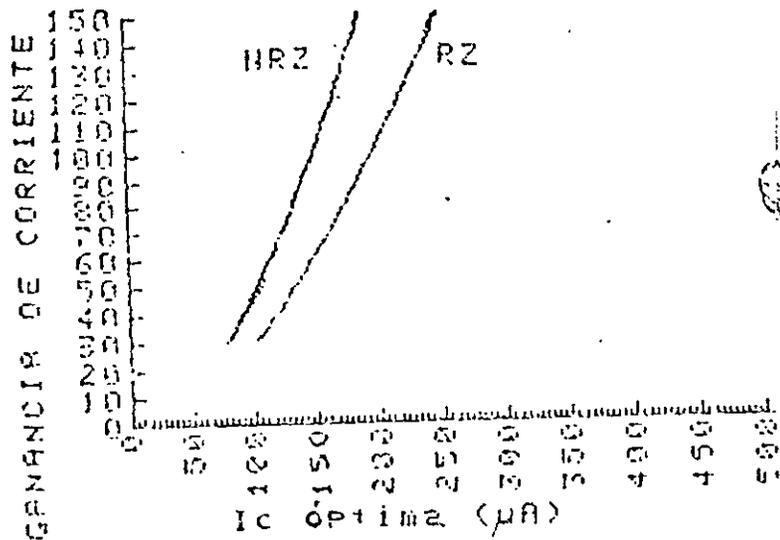


Fig.3.3.-Comportamiento de la corriente de colector óptima para el intervalo de  $\beta$  del transistor MRF931.

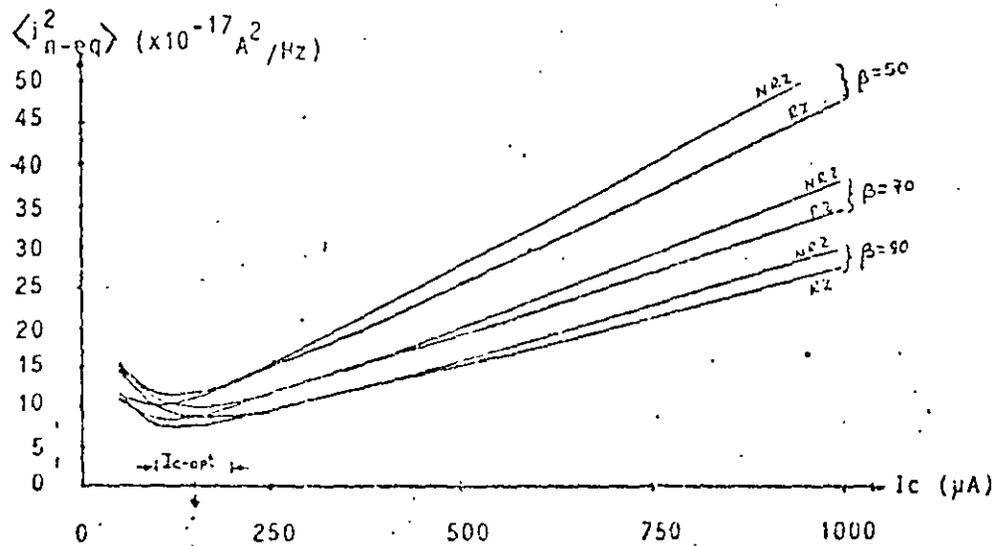


Fig.3.4.-Comportamiento de la corriente de colector de  $T_1$  contra el valor cuadrático medio de la corriente de ruido equivalente de entrada, para diferentes  $\beta$  y los formatos RZ y NRZ

para el formato RZ,  $Z_{trans-BJT} = 1094.5$

para el formato NRZ,  $Z_{trans-BJT} = 1053.6$

La potencia promedio mínima detectable se determina por:  
para el formato RZ

$$\eta \bar{P} = \frac{h\nu B}{2} \left[ 36F_d + \frac{12Z}{M} \right] \quad (W) \quad (3.5)$$

para el formato NRZ

$$\eta \bar{P} = h\nu B I_z \left[ 36F_d + \frac{12Z}{M} \right] \quad (W) \quad (3.6)$$

donde

$h\nu = 1.529 \times 10^{-19}$ , para  $\lambda = 1300$  nm

$B = 139.264$  Mbit/s

$I_z = 0.564$

$F_d = M^x$ ,  $M$  ganancia del APD y  $x = 0.95$

$Z =$  figura de mérito

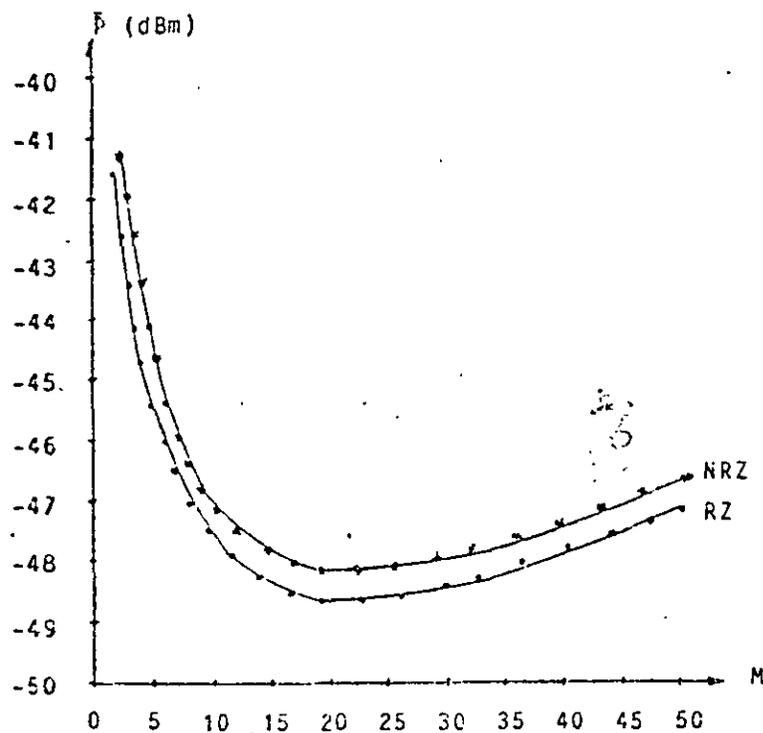


Fig.3.5.-Sensibilidad del preamplificador contra ganancia del APD.

CON EL OBJETO DE OPTIMIZAR EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PREAMPLIFICADOR SE CONSTRUYERON TRES VARIANTES DEL MISMO PARA FINALMENTE SELECCIONAR EL MEJOR, EL CUAL SE DUPLICÓ CON EL PROPOSITO DE ANALIZAR SU REPETIBILIDAD.

NO OBSTANTE DE QUE LA VERSION ELEGIDA ES UNA OPTIMIZACION DE LAS DOS ANTERIORES, ESTOS PROTOTIPOS PUEDEN EMPLEARSE EN EL RECEPTOR CON RESULTADOS SATISFACTORIOS.

LOS PREAMPLIFICADORES SE CONSTRUYERON CON COMPONENTES PASIVOS DE DADO, DE ACUERDO A LOS OBJETIVOS DE LOS DISEÑOS ACTUALES, BASADOS EN LA TECNOLOGIA DE MONTAJE SUPERFICIAL DE COMPONENTES.

LA TECNOLOGIA DE MONTAJE SUPERFICIAL PRESENTA LAS SIGUIENTES VENTAJAS:

- ALTA DENSIDAD
- MEJOR FUNCIONAMIENTO ELECTRICO
- BAJO COSTO DE FABRICACION
- ENSAMBLE AUTOMATICO
- ALTA RESISTENCIA MECANICA

SUS DESVENTAJAS SON:

- REQUIEREN DE UN MANEJO CUIDADOSO
- REQUIEREN DE UN ALMACENAJE ADECUADO

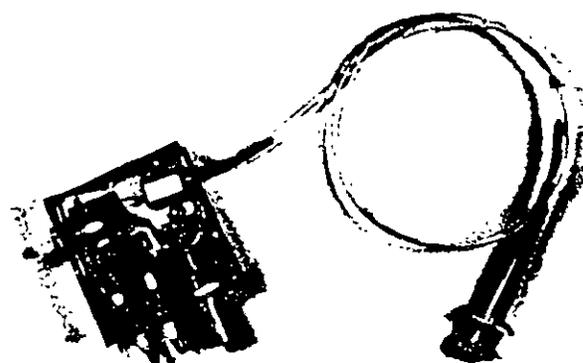
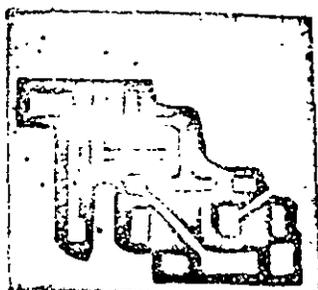


Fig.4.6.-Circuito impreso de los preamplificadores y fotografía de uno de ellos terminado.

#### 4.12.-CONSTRUCCION DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

El amplificador con CAG se construyó en una tableta de fibra de vidrio de doble cara de cobre de 16 x 19 cm. Una de las caras se utilizó para las pistas del circuito y la otra como plano de tierra y pistas de alimentación. En esta tableta también se construyó el filtro Thomson y se dejó el espacio suficiente para colocar el preamplificador y la fuente de polarización con control y protección del fotodetector de avalancha.

Las diferentes etapas del amplificador con CAG se desacoplaron con filtros RC. Los componentes utilizados son discretos y se ensamblaron superficialmente. En la figura 4.7 se muestra la tableta del circuito por el lado de las pistas del receptor óptico.

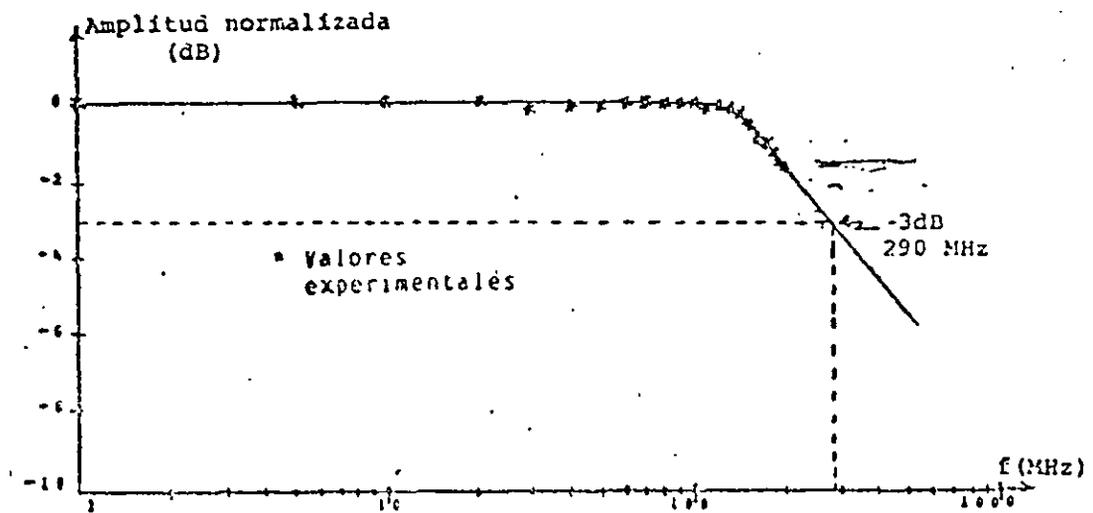
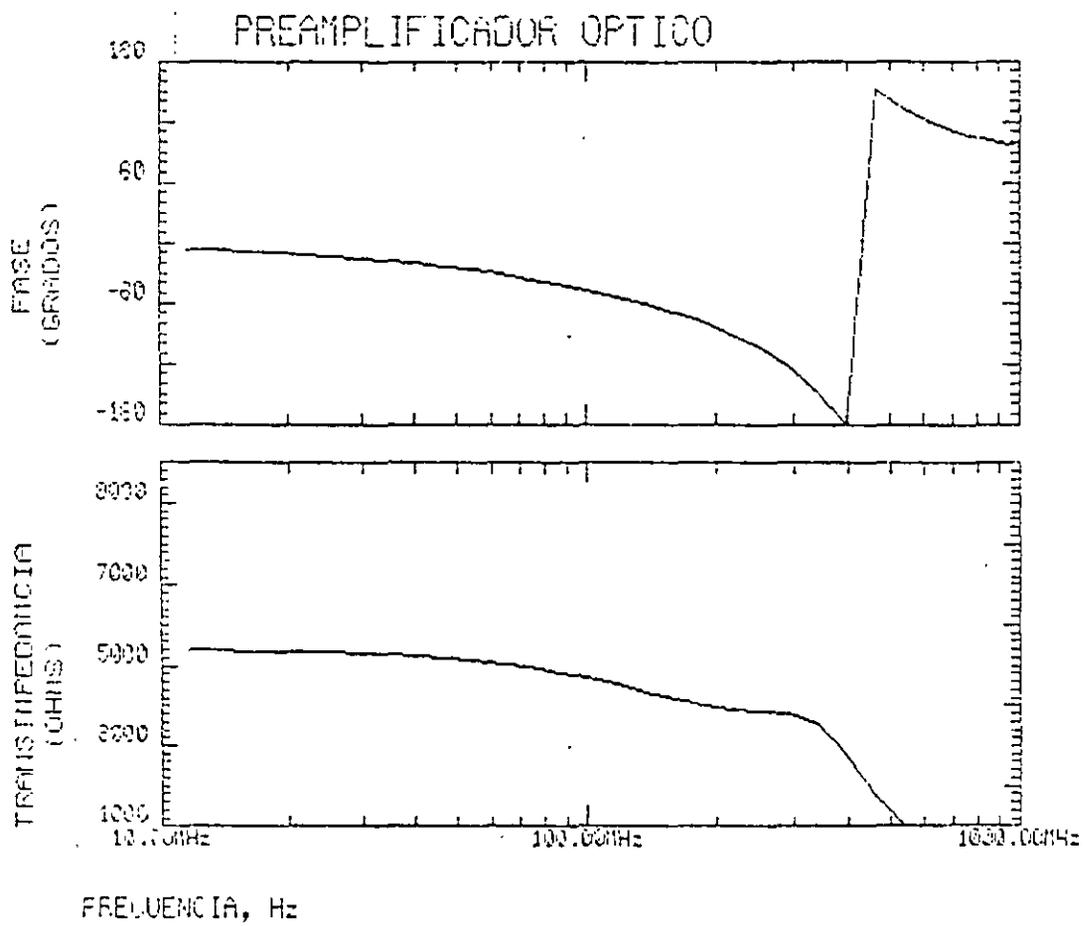
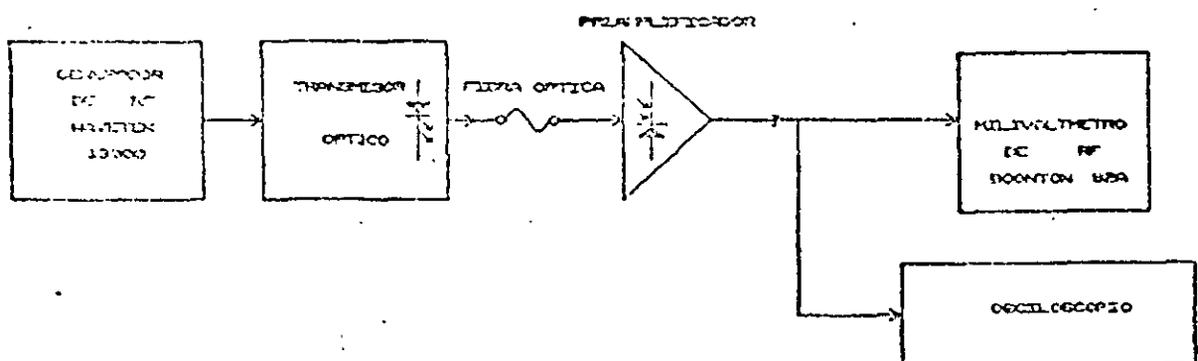


Fig. 4. 11.-Característica amplitud-frecuencia del preamplificador óptico.



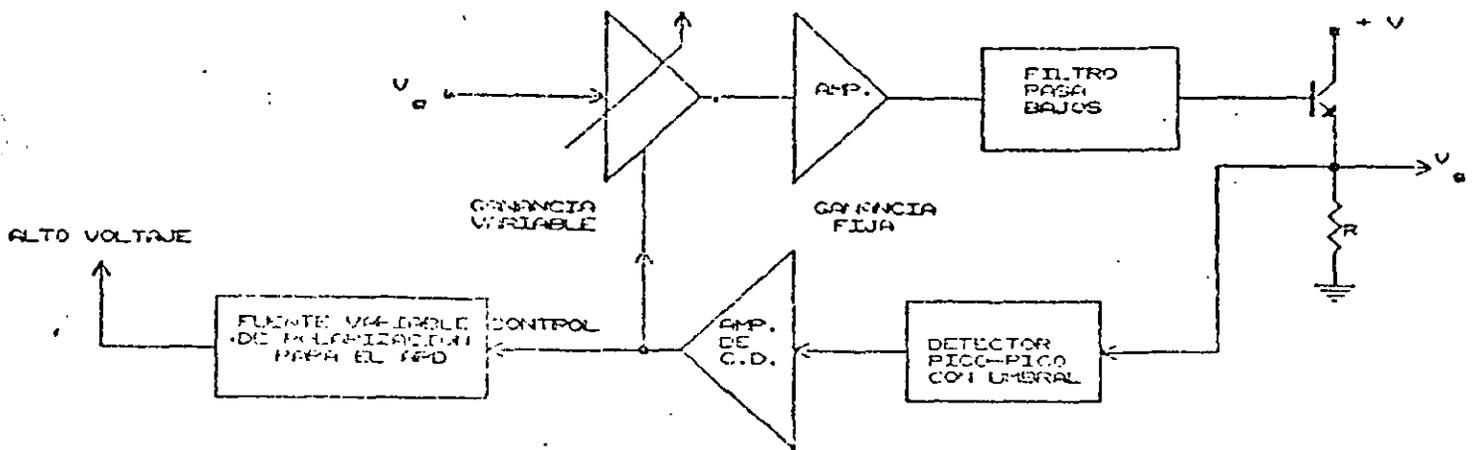


Fig.2.13.-Diagrama a bloques del amplificador con CAG

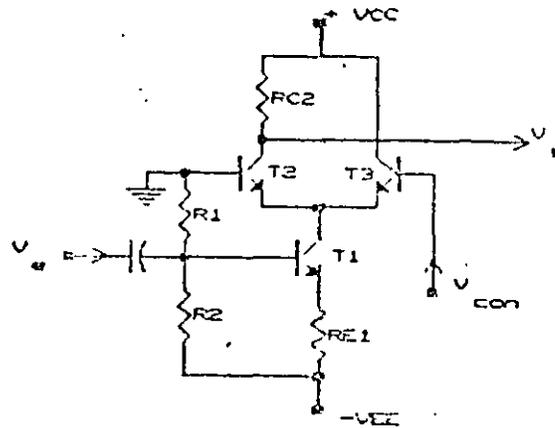


Fig.3.6.-Circuito de la etapa de ganancia variable

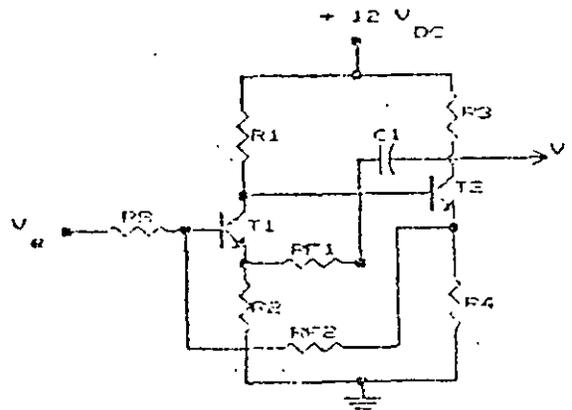


Fig.3.7.-Circuito del amplificador de ganancia constante.

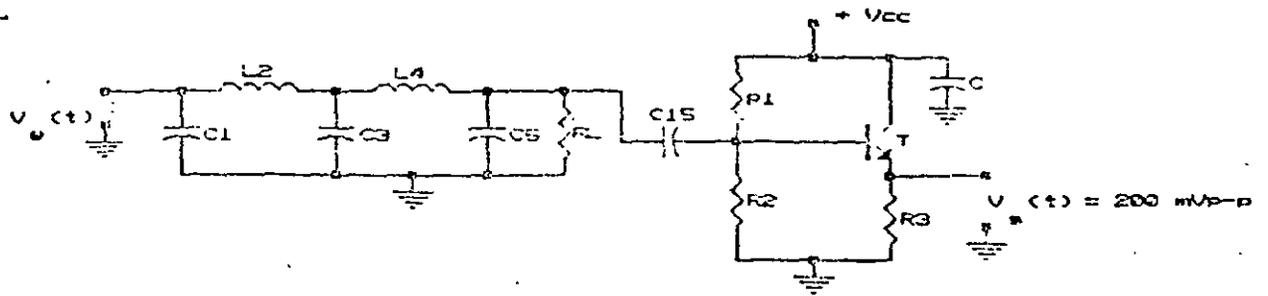


Fig.3.9.-Circuito del filtro Thomson con etapa de desacoplamiento.

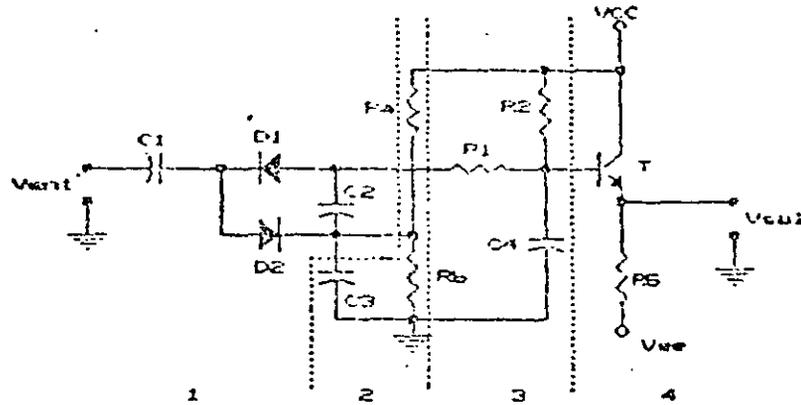


Fig.3.11.-Circuito del detector pico-pico

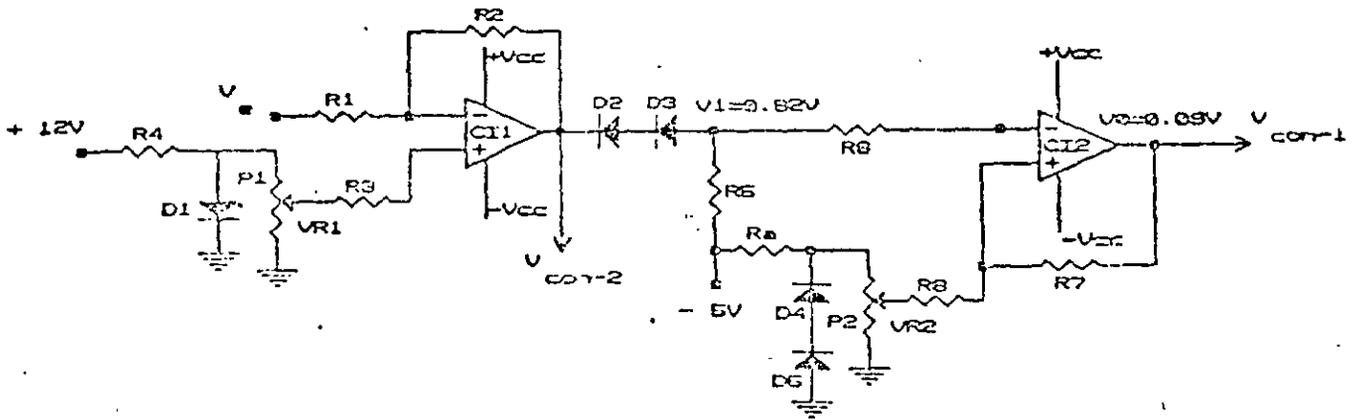


Fig.3.15.-Red de retroalimentación para el control automático de ganancia del receptor óptico

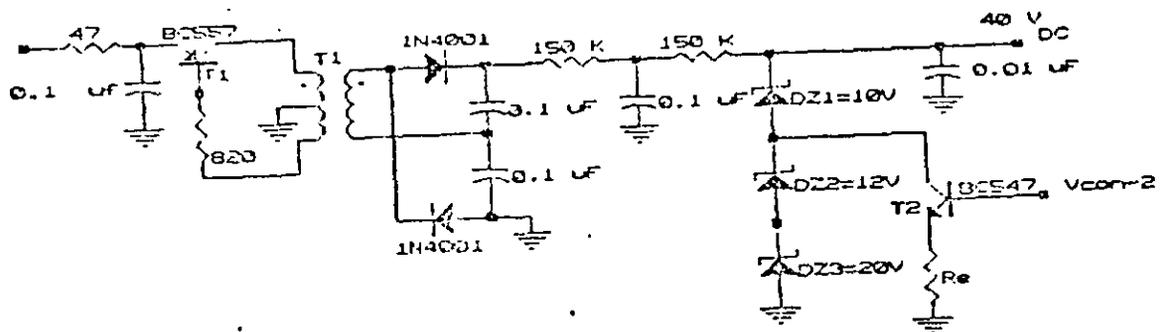


Fig.3.13.-Circuito de la fuente de polarización del APD con 29

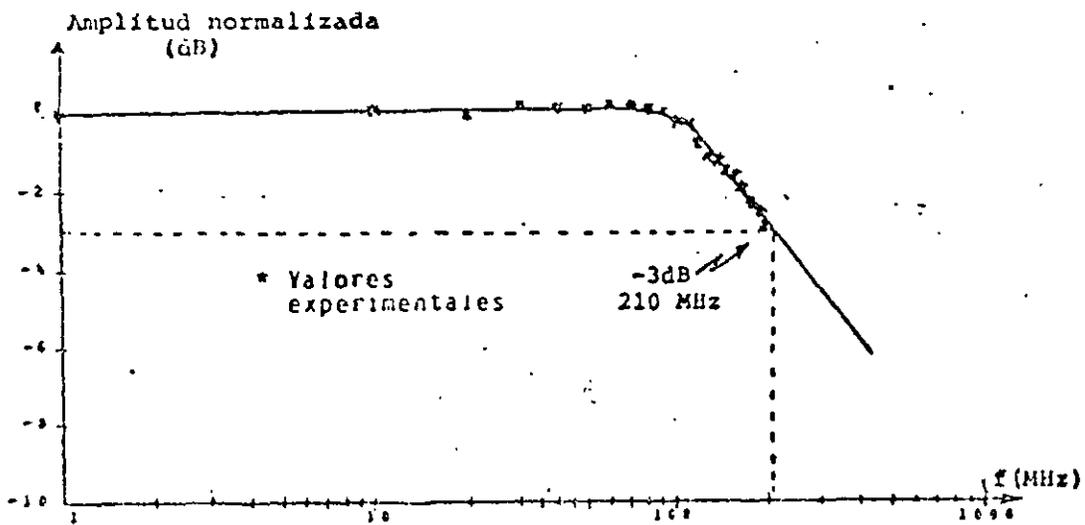
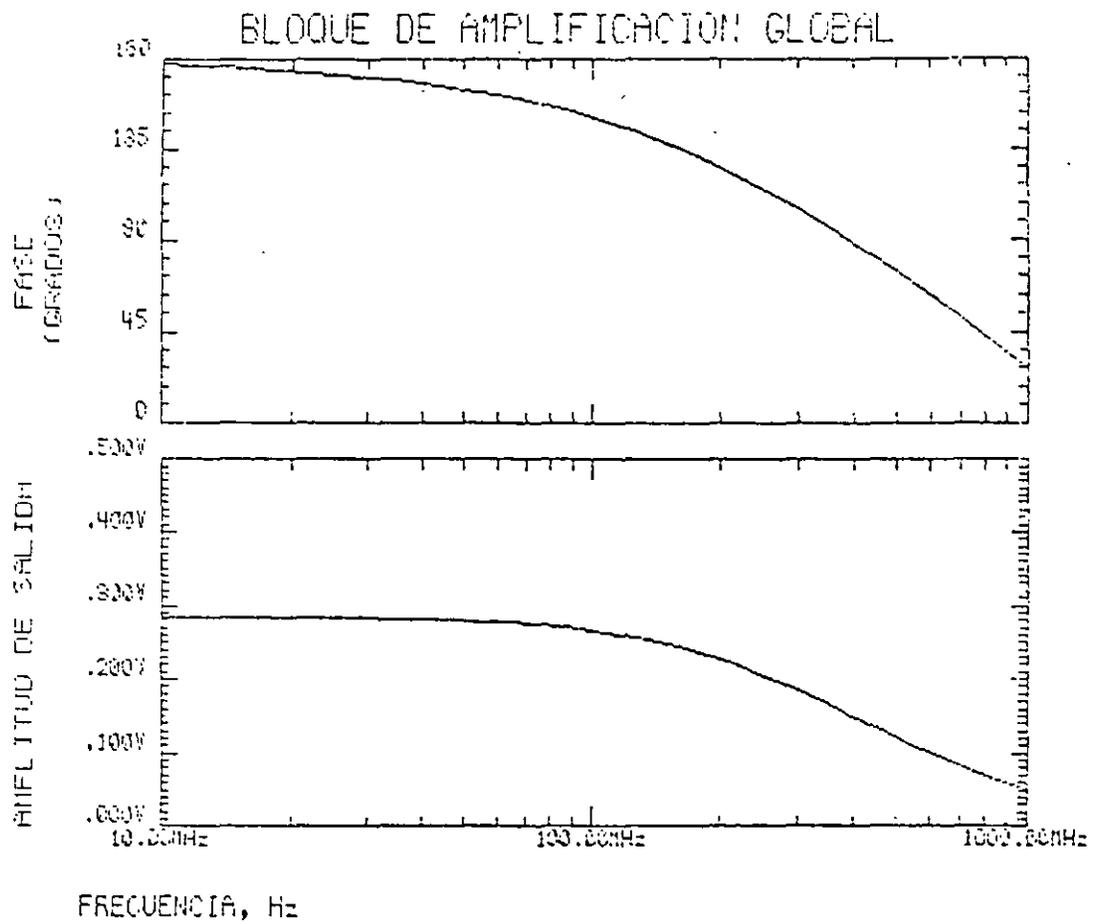


Fig.4.17.-Característica amplitud frecuencia del bloque de RF

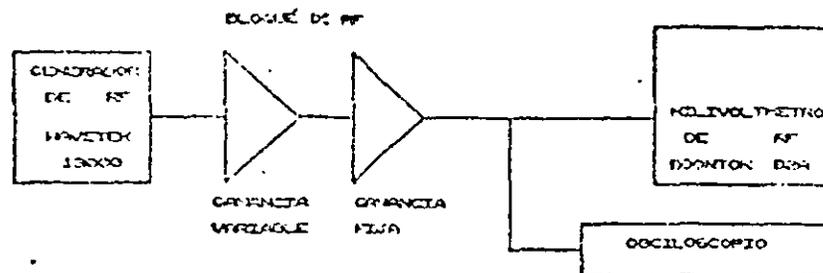


Fig.4.18.-Sistema de medición para la característica de amplitud-frecuencia del bloque de RF.

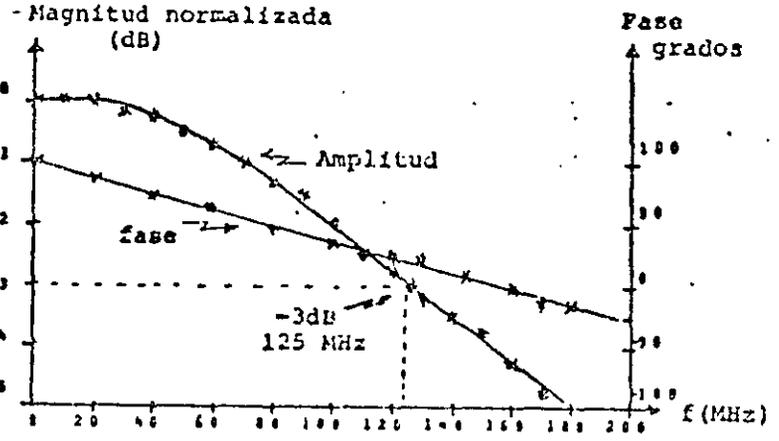
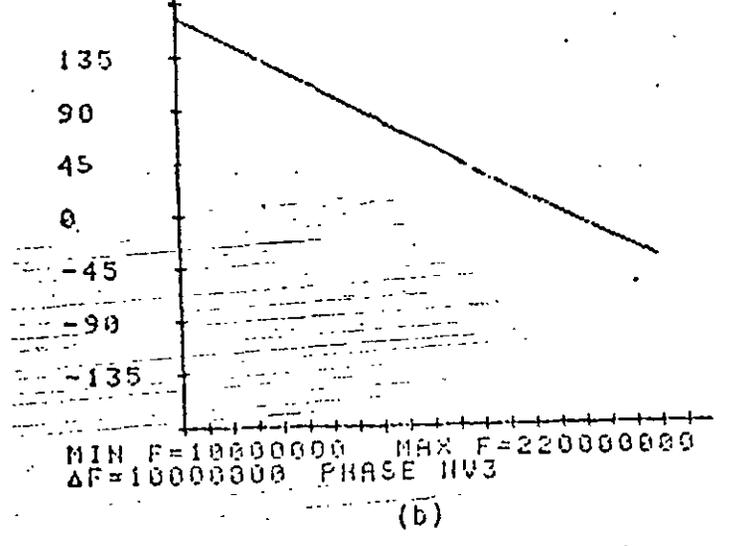
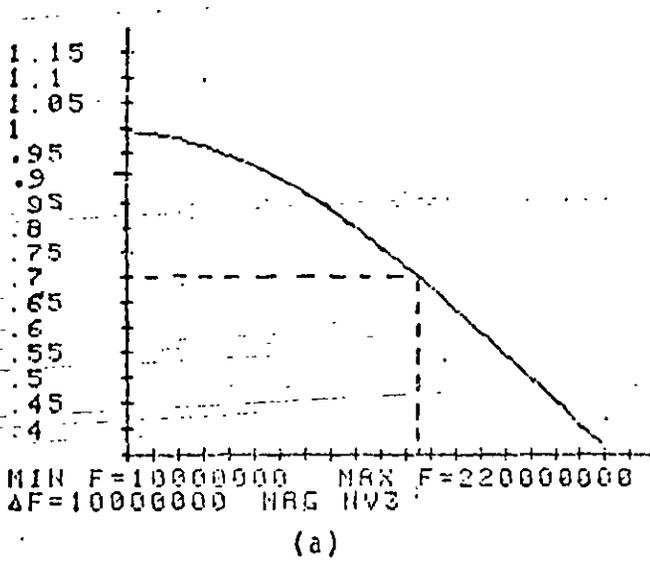


Fig.4.21.-Características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de amplificación de RF en cascada con el filtro Thomson

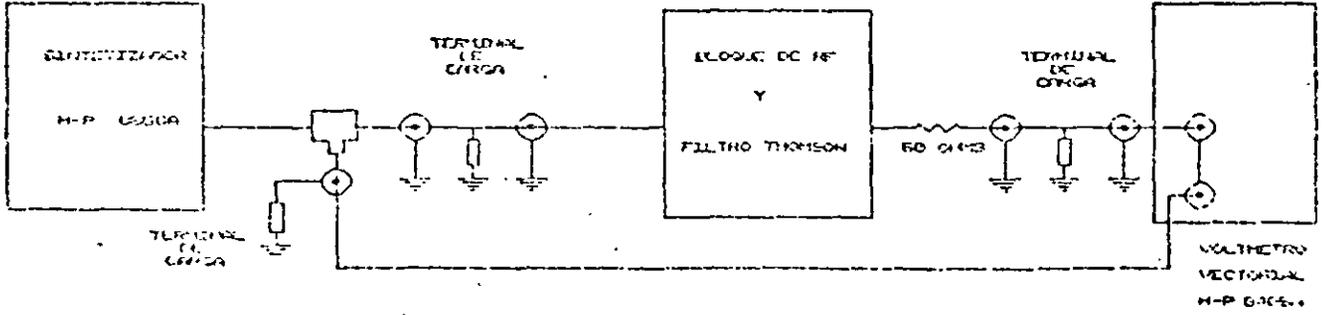


Fig.4.22.-Sistema de medición de las características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de amplificación de RF en cascada con el filtro Thomson.

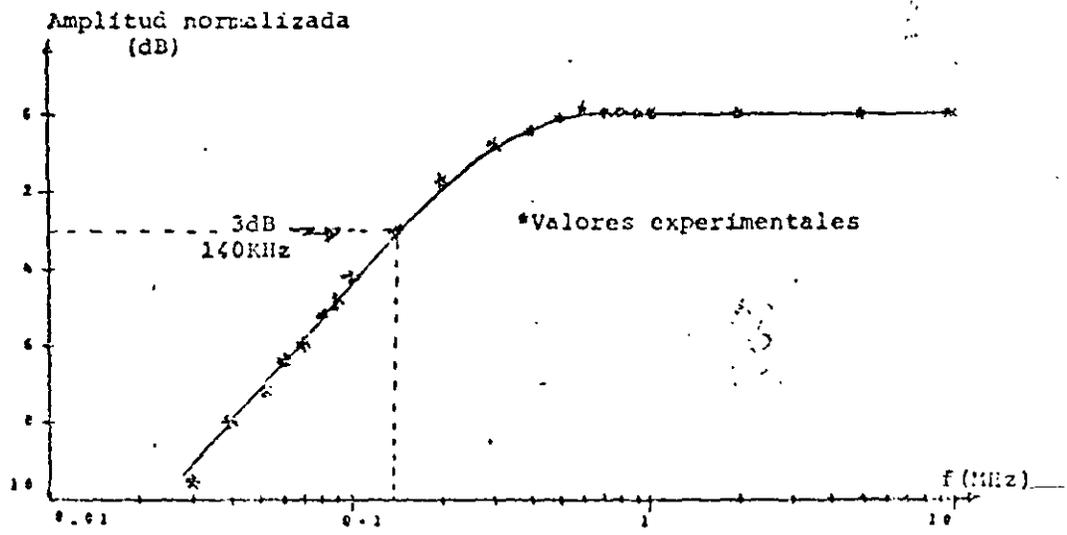
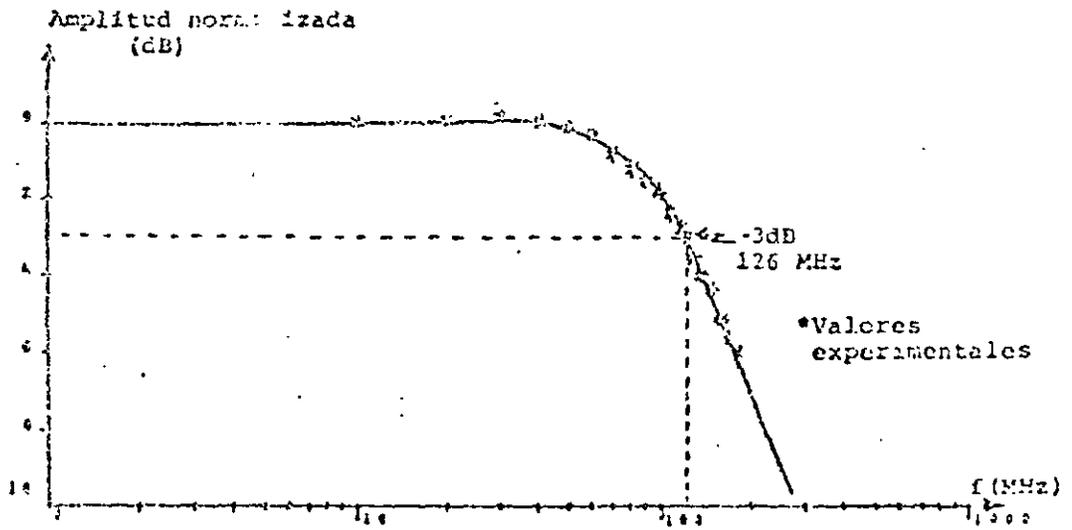


Fig.4.26.-Característica amplitud-frecuencia del receptor óptico para bajas frecuencias.

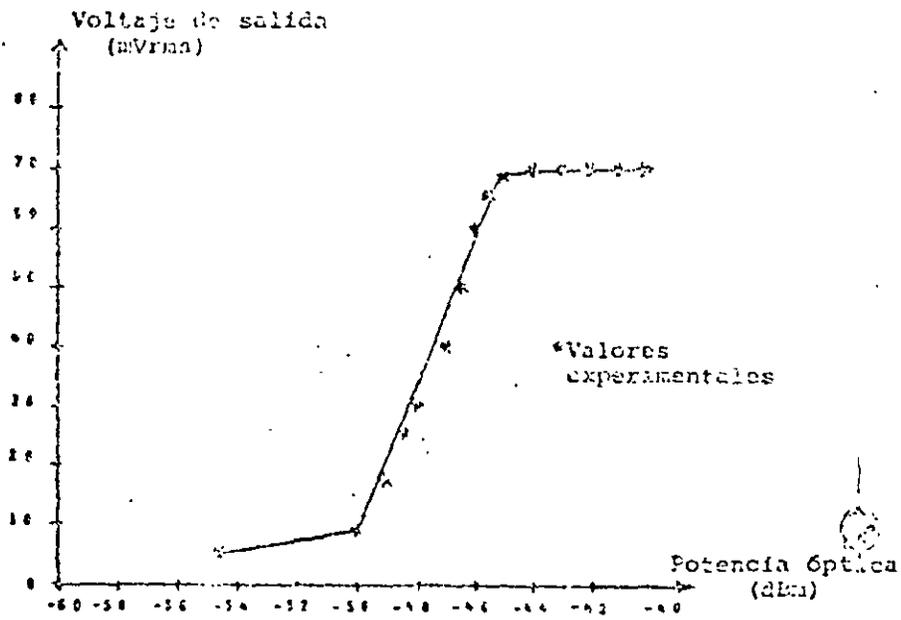


Fig.4.27.-Característica del voltaje salida como función de la potencia óptica de entrada del receptor.

## CONCLUSIONES

EL RECEPTOR OPTICO DISEÑADO Y CONSTRUIDO EN LA FASE DE PROTOTIPO DE LABORATORIO PRESENTA LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS:

### -SENSIBILIDAD MAXIMA

PARA EL FORMATO RZ: -46.6 dBm

PARA EL FORMATO NRZ: -46.1 dBm .

-VELOCIDAD DE TRANSMISION: 139.264 Mbits/s

-TASA DE ERROR:  $10^{-9}$

-INTERVALO DINAMICO: 25 dB

-VENTANA DE TRANSMISION: 1300 nm

-INTERVALO DINAMICO DE LA SEÑAL DE SALIDA:  $\pm 2.6$  mVp-p

-IMPEDANCIA DE SALIDA: 100 $\Omega$

-CARACTERISTICA AMPLITUD-FRECUENCIA PLANA:  $\pm 0.12$  dB EN EL INTERVALO DE FRECUENCIA DE 0.5 - 30 MHz

-CARACTERISTICA FASE-FRECUENCIA LINEAL:  $\pm 3\%$  EN EL INTERVALO DE FRECUENCIA DE 10 - 180 MHz

-ANCHO DE BANDA: A -3dB 126 MHz

EL RECEPTOR OPTICO CONFORME A SUS CARACTERISTICAS PUEDE USARSE EN SISTEMAS DE TRANSMISION DIGITAL DE DISTANCIAS MEDIAS Y LARGAS QUE MANEJEN 1920 CANALES TELEFONICOS CODIFICADOS A 64 KBITS/S O DE 2 A 4 CANALES DE TELEVISION CODIFICADOS A 70 MBITS/S O 34 MBITS/S RESPECTIVAMENTE.

PUEDE UTILIZARSE EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES DE AREAS URBANAS SIMILARES A LAS DE LA CIUDAD DE MEXICO.

LA SENSIBILIDAD DIFIERE ENTRE LO TEORICO Y LO EXPERIMENTAL 3.1 %

PARA EL CASO DEL PREAMPLIFICADOR LAS DISCREPANCIAS SON:

PARA EL ANCHO DE BANDA:

--ENTRE LO CALCULADO CON LA ECUACION PROPUESTA Y LO EXPERIMENTAL ES 2 %

--ENTRE LO SIMULADO Y LO EXPERIMENTAL ES 6.9 %

PARA LA TRANSIMPEDANCIA SE TIENE UNA DISCREPANCIA DE 6.3 % ENTRE LO TEORICO Y LO EXPERIMENTAL

LOS RESULTADOS REFLEJAN QUE EL METODO DE DISEÑO ES EL ADECUADO, INFLUYENDO SIGNIFICATIVAMENTE EL METODO DE CONSTRUCCION UTILIZADO QUE EL DE LA TECNOLOGIA DE MONTAJE SUPERFICIAL.

CON LA CONFIGURACION SELECCIONADA DEL PREAMPLIFICADOR SE HIZO UNA EXPLORACION EXPERIMENTAL NO RIGUROSA ALCANZANDOSE ANCHOS DE BANDA DE 380 MHZ.

SE HAN REPORTADO RESULTADOS SIMILARES CON PREAMPLIFICADORES DE GAAsFET.

SE CONCLUYE LAS TECNICAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCION SEGUIDAS ES UNA BUENA OPCION PARA CONSTRUIR PREAMPLIFICADORES OPTICOS DE ALTA VELOCIDAD, ALTA FUNCIONALIDAD Y BAJO COSTO.

CON RESPECTO AL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

LA ETAPA AMPLIFICACION DE RF.

TIENE UNA CARACTERISTICA AMPLITUD-FRECUENCIA PLANA EN EL INTERVALO DE FRECUENCIA DE INTERES, SU ANCHO DE BANDA ES 210 MHz, LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS TEORICOS SON MUY CERCANOS.

EL DETECTOR PICO-PICO CON UMBRAL DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA ES UN CIRCUITO BASTANTE VERSATIL PUEDE APLICARSE EN UNA GRAN VARIEDAD DE SISTEMAS RADIOELECTRICOS.

LA EFICIENCIA DEL DETECTOR PICO-PICO ES DE 0.9

SU UMBRAL SE FIJA PARA EL NIVEL DE AMPLITUD A PARTIR DEL CUAL EL CONTROL SE REALIZA.

LA ESTIMACION DEL COMPORTAMIENTO DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA SE REALIZO EN TODO EL INTERVALO DINAMICO DE LA POTENCIA OPTICA LA DISCREPANCIA CON RESPECTO A LO PREDICHO ES DEL 8%

EL FILTRO PASA BAJOS REQUIERE COMPONENTES DE PRECISION DE 1% O MENOR PARA QUE EL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL SEA APROXIMADAMENTE IGUAL AL TEORICO. CON RESPECTO A LA FRECUENCIA DE CORTE SE OBTUVO UNA EXACTITUD DEL 8%.

EL CIRCUITO DE PROTECCION DEL APD SE LIMITA A UN VALOR MAXIMO DE 40.1 VOLTS DE CORRIENTE DIRECTA Y A UN VALOR MINIMO DE 10 VOLTS DE CORRIENTE DIRECTA.

LA POLARIZACION DEL APD SE FIJO A LA GANANCIA OPTIMA (38.6 VOLTS)

EL ANCHO DE BANDA DEL RECEPTOR ES 140 KHz A 126 MHz

EL INTERVALO DINAMICO DE POTENCIA OPTICA DEL RECEPTOR ES DE  
-45 dBm A -20 dBm

EL INTERVALO DINAMICO DEL FOTODETECTOR ES DE 6 dB

EL INTERVALO DINAMICO DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA ES DE 19 dB.

ESTE RECEPTOR FUNCIONA EFICIENTEMENTE EN JERARQUIAS MENORES PARA LAS QUE FUE DISEÑADO

CON ESTE TRABAJO SE HA OBTENIDO LA EXPERIENCIA EN EL DESARROLLO DE LA ELECTRONICA DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR CABLES DE FIBRAS OPTICAS DE MEDIANA Y ALTA VELOCIDAD, ESPECIALMENTE EN LA CONSTRUCCION DE MONTAJE SUPERFICIAL.

CREEMOS QUE EL PRESENTE TRABAJO REPRESENTA UN PASO IMPORTANTE EN EL DESARROLLO DE NUESTRO PAIS EN EL CAMPO DE LA ELECTRONICA DE ALTA VELOCIDAD Y DE LAS COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS Y COMO CONSECUENCIA ES UN IMPULSO A LA FORMACION DE RECUERSOS HUMANOS.

EL RECEPTOR PRESENTA CARACTERISTICAS SIMILARES A LOS RECEPTORES DE  
LOS SISTEMAS COMERCIALES :

TNO 4132

## 140 Mbit/s MULTIPURPOSE optical line terminal

### TECHNICAL DATA

#### Line Terminal

Junction (cross connect) : CMI  
Code : 139, 264 Mbit/s  $\pm$  15 ppm  
Loss : 12 dB max at 69, 632 MHz  
Jitter : Compatible with CCITT G 703  
Impedance : 75  $\Omega$  unbalanced  
Line rate : 278.528 Mbit/s

#### Repeater

Code : CMI  
Line rate : 278.528 Mbit/s  
Monitoring data transmission interface :  
1 200 baud modem (V 23 interface)

	MULTIMODE FIBRE	MONOMODE FIBRE
Output power injected	0 dBm	- 3 dBm
Power received	- 36 dBm (for BER $10^{-9}$ ) - 30 dBm *	- 36 dBm (for BER $10^{-9}$ )
Power budget	36 dB	33 dB
Recommended system margin	4 dB	4 dB
Loss of spliced link (suggested)	1.25 dB/Km	0.8 dB/Km
Maximum suggested repeater spacing	20 Km *	35 Km

\* For a 6 dB bandwidth of 100 MHz.

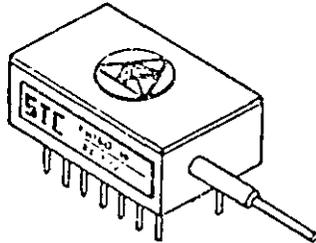
### OPTICAL CHARACTERISTICS

Transmission medium : Monomode fibre or  
multimode graded index fibre  
Source : Laser diode  
Wavelength : 1,3  $\mu$ m  
Spectral width : 3 nm  
Detector : PIN-FET  
AGC dynamic range : 20 dB

# Fibre Optic Receiver

# PH series

Wavelength 1000nm to 1600nm.



### FEATURES

- \* InGaAs Photodetector PIN diode & GaAs FET preamplifier.
- \* HIGH IMPEDANCE INTEGRATING design for very high sensitivity.
- \* Suitable for bounded data at rates from 2.0 to 320 Mbaud.
- \* Novel stabilizing network ensures suppression of oscillation.
- \* Epoxy-free, hermetic metal package.
- \* 50/125  $\mu$ m graded index fibre tail.

### DESCRIPTION

This F/O receiver consists of a high responsivity III-V PIN detector, a low noise FET preamplifier, and a bipolar output stage. This design integrates the input signal for maximum sensitivity. A hybrid circuit within an all metal hermetic DIL package combines low parasitic design with ruggedized construction.

### CHARACTERISTICS

Conditions: Ambient temperature, 22°C.  
Output, fully equalized.  
Load impedance, 50 ohms.  
Wavelength, 1300nm nom.

Parameter	Min.	Typ.	Units
Sensitivity @ BER = $10^{-9}$ (rms noise voltage test)			
Line rate 2 Mbaud	-56.5	-58.5	dBm
16 Mbaud	-52.0	-54.0	dBm
45 Mbaud	-49.0	-51.0	dBm
90 Mbaud	-46.0	-48.0	dBm
160 Mbaud	-43.0	-45.5	dBm
* Dynamic range	18.0	20.0	dB
Detector responsivity	0.65	0.85	A/W
Total Leakage Current		20.0	nA

Data on receivers for use at other line rates is available upon request.

\* The dynamic range @ BER= $10^{-9}$  is defined as :  
the system overload point (using NRZ 2<sup>7</sup>-1 PRBS data)  
minus the sensitivity (using the rms noise voltage test)

EL RECEPTOR SUPERA LAS CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS RECEPTORES DE LOS SISTEMAS COMERCIALES:

**MAIN PARAMETERS OF 32Mb/s & 100Mb/s FIBER OPTIC SYSTEMS**  
(N. T. T.)

	F-32M	F-100M
Information Rate	32.064Mb/s	97.728Mb/s
Line Code	CMI	8B1C
Clock Frequency	64.128MHz	111.689MHz
Allowable Cable Loss *	35 dB (S), 22 dB (L)	
Optical Source *	GaAlAs LD (S), InGaAsP LD (L)	
Optical Detector *	Si-APD (S), Ge-APD (L)	
Loss Margin	Cable	4 dB
	System	2~8.5 dB
Repeater Spacing *	10km (S), 15km (L)	
Error Rate	less than $10^{-11}$ /REP	
Line Supervision	Coding Rule Check	Parity Check.
Service System : Stand by System	11 : 1	

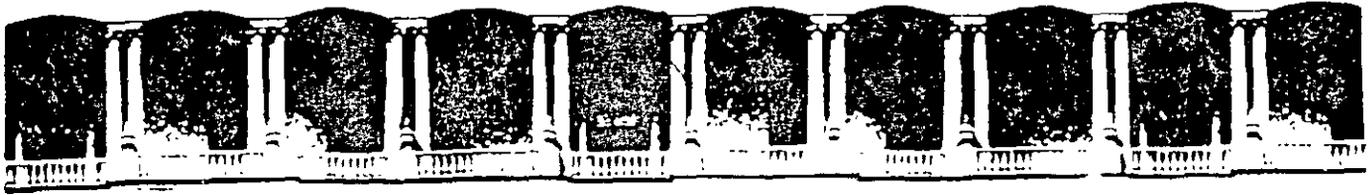
\* (S) shows 0.85  $\mu$ m, (L) shows 1.3  $\mu$ m

**NEC**

SYSTEM	2MB FOTS	8MB FOTS	34MB FOTS	140MB FOTS
EQUIPMENT	FD-1015A-L	FD-2015A-L	FD-3009A-L	140M-FM-3A-L
PARAMETERS	O-LTE	O-LTE	O-LTE	MPX(OPT)
Line Bit-rate	2.048Mb/s	8.448Mb/s	34.641Mb/s	139.264Mb/s
Wavelength	1300nm(nominal)			
Optical Source	InGaAsP-ILD			
Optical Device	Ge-APD			
Line Code	Code Mark Inversion(CMI)		Scrambled Binary	
Transmitter Output (peak power)	+2dBm ±0.5dB			
Transmitter Output (average power)	-1dBm ±0.5dB		-4dBm ±0.5dB	
Receiving Sensitivity (BER=10 <sup>-11</sup> )	-47.0dBm	-43.0dBm	-38.0dBm	

Optical Fiber Transmission Mode				
System	2M FOTS	8M FOTS	34M FOTS	140M FOTS
Equipment	FD-1015A-L OLTE	FD-2015A-L OLTE	FD-3009A-L OLTE	140M-FM-3A-L MUX(OPT)
Line Bit Rate (lo)	2.048 Mb/s	8.448 Mb/s	34.641 Mb/s	139.264 Mb/s
Wavelength	1300nm ±0.03μm			
Optical Source	InGaAsP-ILD			
Optical Detector	Ge-APD			
Line Code	Code Mark Inversion (CMI)		Scrambled Binary (Mark Ratio = 50%) (Duty Cycle = 50%)	
Equipment	Source output power in the fiber (peak power)			
	+2dBm ±0.5dB			
	Source output power in the fiber (average power)		-4dBm ±0.5dB	
	-1dBm ±0.5dB			
Equipment	Connection loss in the equipment			
	3dB			
Equipment	Operating margin for the equipment			
	2dB			
Link Loss Budget	Allowable Link Loss			
	40.5dB	36.5dB	33.5dB	28.5dB
	Connection loss between the transmitter and line			
	1.5dB			
Line	Penalty for fiber bandwidth limitation (dB)			
	Not necessary			1.5dB
	Required fiber bandwidth (-3dB optical)			
	> 8MHz	> 32MHz	> 68MHz	> 112MHz
Line	Operating margin for the cable			
	3dB			
Total line loss including splicing loss				
36dB				
Maximum Repeater Spacing				
(Example: 1.3dB/km including splicing loss)				
27.7km				
24.6km				
22.3km				
17.3km				

NEC



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN, ENLACE Y  
SISTEMAS DE FIBRAS ÓPTICAS**

**CONFERENCISTA  
ING. DANIEL PINEDA C.  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

## 2.3. ATENUACION DISTORSION Y ANCHO DE BANDA.

### 2.3.1. Dispersión en fibras ópticas.

Los mecanismos de dispersión en fibras ópticas son los causantes de las limitaciones de ancho de banda en estos sistemas. La dispersión se entiende básicamente como un ensanchamiento temporal del pulso óptico inyectado a lo largo de su viaje por la fibra.

Existen tres mecanismos básicos de dispersión en las fibras que son:

- a) Dispersión Intermodal.
- b) Dispersión del Material.
- c) Dispersión de Guía de Onda.

Es el efecto conjunto de estos tres fenómenos lo que determinará finalmente el ancho de banda de la fibra.

La dispersión intermodal es prácticamente independiente del ancho espectral de la fuente excitadora y depende básicamente del número de modos que viajan en la fibra y de la diferencia de velocidad entre el más rápido y el más lento.

La dispersión material y la dispersión de guía de onda son fenómenos cromáticos, es decir, dependen de la longitud de onda central y del ancho espectral de la fuente.

En fibras multimodales el factor dominante es la dispersión modal que es particularmente fuerte para la fibra de índice escalonado y mucho menor para la fibra de índice gradual.

Si se utiliza un LED como emisor el efecto del material es grande.

En fibras multimodales de índice gradual la dispersión material y modal cooperan aproximadamente con la misma proporción en la dispersión total si se usa un láser en  $0.85\mu\text{m}$ ., sin embargo, para un láser en  $1.3\mu\text{m}$ . la dispersión material disminuye a un valor despreciable.

En una fibra monomodal, la dispersión modal no existe y la combinación de dispersión material y de guía de onda determinan la dispersión total que es mucho menor que en las fibras multimodales.

Para estas fibras en  $\lambda = 1.27 \mu\text{m}$ , la dispersión cromática cambia de signo y se elimina teóricamente con la dispersión intramodal en  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ . El ancho de banda en este punto es enorme.

Analícemos ahora las tres formas de dispersión.

### Dispersión Intermodal.

La dispersión intermodal es el resultado de la diferencia de velocidades de viaje entre los modos que se propagan. Obtener una fórmula exacta para el valor de esta dispersión es demasiado complicado y en general no tiene sentido. Por ejemplo para una fibra de índice escalonado de  $50 \mu\text{m}$  de diámetro donde se transmiten hasta 800 modos, es inútil conocer la velocidad individual de cada modo. Los métodos de óptica geométrica aproximan la multitud de modos a un volumen continuo y se obtiene un tiempo de propagación en función de una variable que representa el orden del modo.

Una aproximación más sencilla pero muy burda consiste en considerar solo la velocidad de los modos más rápido y más lento de acuerdo a su trayectoria de rayo.

Esta diferencia es entonces, para una fibra de índice escalonado:

$$\Delta \tau = n_1 L/c - n_2 L/c = \frac{n_1 \Delta L}{c} \quad (2.3.1.)$$

$$\tau_m = \Delta^2 / L = \frac{(NA)^2}{2n_1 c} \quad (2.3.2.)$$

Esta aproximación no considera la forma del pulso de salida y generalmente se toma una forma rectangular.

El análisis para la fibra óptica de índice gradual puede llevarse a cabo exactamente en los mismos términos.

Para la fibra de índice parabólico, la relación entre los tiempos de propagación de un rayo incidente con ángulo  $\theta$ , con respecto a un rayo axial ( $\theta=0$ ), se puede ver en el siguiente análisis.

Tomando la relación:

$$\frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} = \frac{\int_0^{L_0} \frac{n(r)}{c} ds}{\frac{n(0)}{c} L_0} = \frac{L_0}{L_0} \int_{z=0}^{L_0} \frac{n(r)}{n(0)} ds \quad (2.3.4.)$$

con:

$$n(r) = n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (2.3.4.)$$

obtenemos:

$$z(\theta_0) = \left(1 + \frac{\sin^4 \theta_0}{4 \cos^2 \theta_0}\right) z(0) \quad (2.3.5.)$$

y con:

$$\Delta z = z(\theta_0) - z(0) = \frac{\sin^4 \theta_0}{4 \cos^2 \theta_0} \frac{n_0 L}{c} = \frac{L}{c} \frac{\sin^4 \theta_0}{4 n^3} \quad (2.3.6.)$$

Tenemos:

$$\Delta z_{\text{mod}} = \frac{\sin^4 \theta_0}{4 n^3} \frac{L}{c} = \frac{n_0 \Delta^2 L}{c} \quad (2.3.7.)$$

La figura (2.3.1.), ilustra este efecto.

Sin embargo la aproximación presentada no es suficiente, el análisis de óptica geométrica desarrollado para fibras cuyo perfil de índice de refracción sigue la ley: —

$$n(r) = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right] \quad 0 < r < a \quad (2.4.8.)$$

Donde  $n_0$  es el índice de refracción en  $r=0$

y  $\Delta = (n_0 - n(a))/n_0$

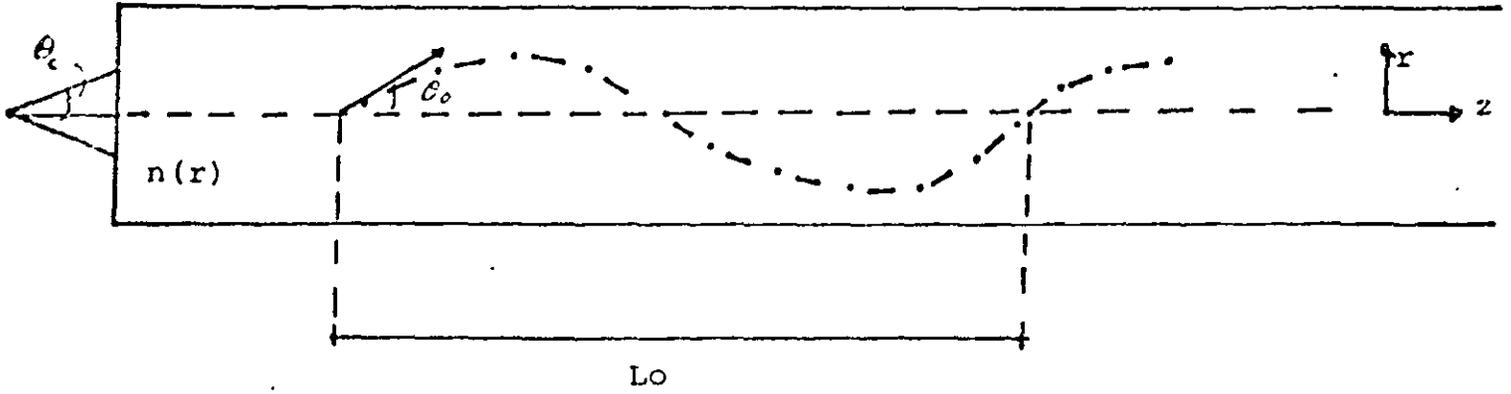
muestra el siguiente resultado para la dispersión modal

$$z(u) = \frac{L n_0}{c} \left[ 1 + \Delta \left(\frac{\alpha - 2 - \epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{u}{M}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha+2}} + \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{3\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{u}{M}\right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}} \right] \quad (2.3.9.)$$

$$+ \frac{\Delta^3}{2} \left(\frac{5\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{u}{M}\right)^{\frac{3\alpha}{\alpha+2}} \right] + O(\Delta^4)$$

Dispersión Modal

Fibra Óptica de Índice gradual



Tiempo de propagación para un rayo con ángulo  $\theta_0$  en  $r=0$

figura 2.3.1.

Donde:

$\mu$  es la variable que identifica el orden del modo.

$M$  es el número máximo de orden que un grupo de modos puede llevar.

$$\epsilon = \frac{2n_1 \kappa}{m_1 \Delta} \frac{d\Delta}{dk} \approx - \frac{2\lambda}{(NA)^2} \frac{d(NA)^2}{d\lambda} \quad (2.3.10.)$$

$$y \quad m_1 = n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \quad (2.3.11.)$$

La figura (2.3.2.) muestra los perfiles de índice de refracción para varios valores de  $\alpha$ . La figura (2.3.3.) muestra los valores del retardo en función de la variable .

Es fácil demostrar que  $\Delta z$  tiene un mínimo para:

$$\alpha = 2 + \epsilon - 2\Delta \quad (2.3.12.)$$

En este valor la dispersión total se reduce a:

$$\Delta z = \frac{m_1 \Delta^2}{8c} L \quad (2.3.13.)$$

#### Dispersión del material.

El hecho de el vidrio sea un material dispersivo, es decir, que cambie su índice de refracción efectivo en función de la longitud de onda, obliga a todos los análisis electromagnéticos o de óptica geométrica a tomar en cuenta este efecto. El resultado final es simple campos de diferente longitud de onda tendrán diferente velocidad de propagación en el material y esto es una nueva causa de dispersión. Por ejemplo el tiempo de propagación de un rayo en la teoría mas simple es:

$$z = \frac{2a n_1}{c \cos \theta} \quad (2.3.14.)$$

Sin embargo, teniendo en cuenta la dependencia de  $n_1$  en  $\lambda$  toma la forma:

$$z = \frac{2a m_1}{c \sin \theta} \quad (2.3.15.)$$

Donde:

$$m_1 = n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \quad (2.3.16.)$$

La figura (2.3.4) muestra las variaciones de  $n_1$  y de  $m_1$  en función de  $\lambda$  para las longitudes de onda de interés.

Para una fuente de ancho espectral finito se tendrá la dispersión del material porque las señales de diferente longitud de onda tendrán diferentes velocidades de grupo. El tiempo de tránsito de un modo viajando a la longitud de onda  $\lambda$  puede relacionarse con la longitud de onda central de la fuente  $\lambda_0$  mediante una expansión en series de Taylor:

$$z(\lambda) = z(\lambda_0) + (\lambda - \lambda_0) \left. \frac{dz}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} + \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2} \left. \frac{d^2z}{d\lambda^2} \right|_{\lambda_0} \dots (2.3.17.)$$

El término dominante en los lasers y LEDs típicos ( $\lambda - \lambda_0 = 2,30$  nm.) será el de la primera derivación. Ahora si notamos la fórmula (2.3.16.) el factor que determina la dispersión es:

$$\frac{1}{c} \frac{dm_1}{d\lambda} = -\lambda/c \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} = M_1(\lambda) \quad (2.3.18.)$$

La gráfica de la figura (2.3.5.) muestra los valores de  $M_1$  para  $\text{SiO}_2$ . Vemos de la figura que  $M_1 = 80$  ps./nm./Km. a  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ . implicando que para un ancho espectral de 40 nm., la dispersión del material será de 3 ns./Km. Como se indicó antes  $M_1$  decrece, hasta pasar por cero en  $\lambda = 1.27 \mu\text{m}$ . implicando una disminución significativa de la dispersión en esta zona, donde otros miembros de la expansión (2.3.17.) son significativos.

La longitud de onda de dispersión material cero depende desde luego de la composición del vidrio, en el caso de  $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$  varía entre  $1.27 \mu\text{m}$ . y  $1.39 \mu\text{m}$ .

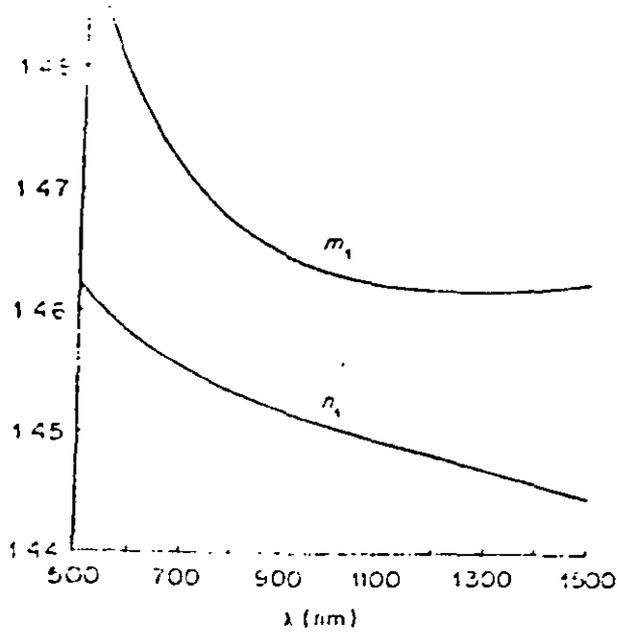


Figura (2.3.4).- Variación de  $n_1$  y  $m_1$  en las longitudes de onda de interés.

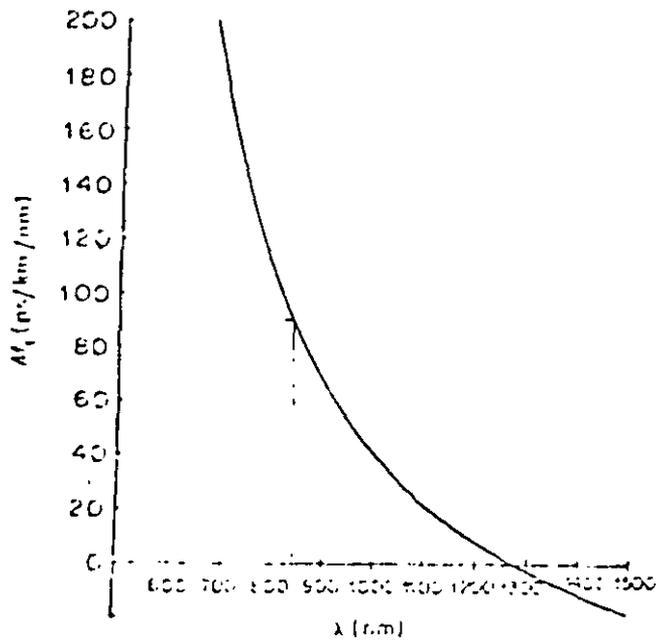


Figura (2.3.5).- Variación de  $M_1$  en función de la longitud de onda.

### Dispersión de Guía de Onda.

Aun considerando que el índice de refracción permaneciera constante y un solo modo se transmitiese aparecería un efecto de dispersión cromático si la fuente tuviera un ancho espectral determinado. Considerese la fórmula siguiente:

$$z = \frac{2L n_1}{c \sin \theta} \quad (2.3.19.)$$

Si cambia la longitud de onda de trabajo debe cambiar aunque  $n_1$  permanezca constante. La razón es que el ángulo  $\theta$  cambiaría. En efecto de la teoría modal sabemos que solo ciertos ángulos discretos de propagación  $\theta_n$  son permitidos. Son estos ángulos los que definen los modos. Si cambia la longitud de onda de propagación los ángulos permitidos cambian también, es decir, cada modo toma una velocidad de viaje ligeramente distinta. La diferencia de velocidades de viaje para un modo cuando es excitado en diferentes longitudes de onda es la dispersión intramodal.

La figura (2.3.6.) muestra una gráfica de velocidad de propagación (normalizada) contra frecuencia (normalizada) en la región monomodal la figura muestra la diferencia entre velocidad para una excitación laser. En esta región solo la dispersión del material y la de guía de onda existen. La dispersión intramodal para un laser de 2 nm. de ancho espectral es de 0.01 ns/Km. por lo que para los valores de dispersión vistos en fibras multimodo, el efecto es despreciable.

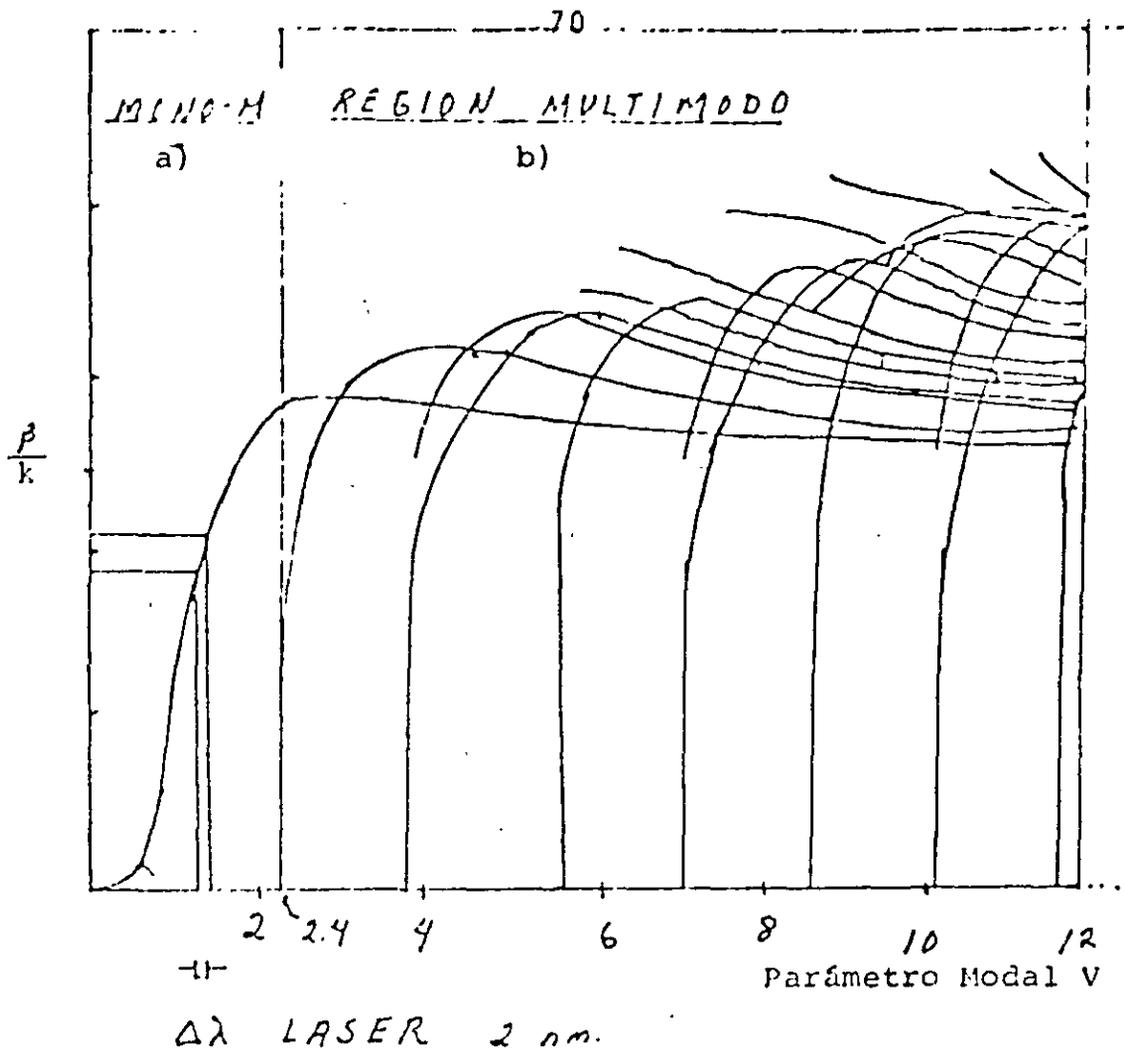


Figura (2.3.6).- Regiones de propagación. a) Monomodal y b) Multimodal.

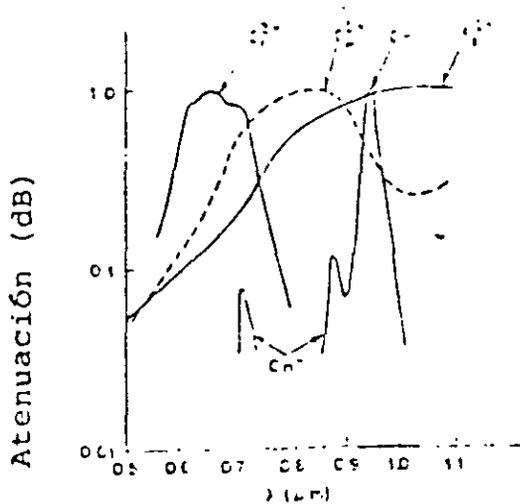


Figura (2.3.7).- Bandas de absorción de diferentes impurezas.

### - 2.3.2.- Atenuación en fibras ópticas

La atenuación en fibras ópticas ha sido siempre un impedimento principal en su uso. Aún hoy en día desde un punto de vista económico representa uno de los mayores retos.

La atenuación puede dividirse de acuerdo a sus causas, en atenuación por absorción o pérdidas de calor y atenuación por dispersión o pérdidas por radiación. La absorción se puede dividir a su vez en dos tipos, intrínseca y por impurezas extrínsecas. La dispersión se puede dividir en tres tipos: intrínseca, por inhomogeneidades en el vidrio y aberraciones en la distribución radial del índice de refracción.

La absorción es el proceso por el cual la energía electromagnética del campo luminoso excita un sistema atómico que tiene una resonancia de oscilación a la misma frecuencia que el campo incidente. El efecto es entonces la absorción de la energía óptica en un campo de vibración mecánica del sistema atómico.

La absorción intrínseca ocurre por definición cuando el material se encuentra en un estado perfecto. En condiciones normales, materiales dieléctricos como el vidrio son considerados perfectamente transparentes. Esto es cierto para la mayoría de las aplicaciones pero no para las fibras donde los coeficientes de atenuación con tres órdenes de magnitud menores se trabajan. Conocer estos fenómenos es de básica importancia para obtener los límites fundamentales de transmisión en fibras.

Los vidrios transparentes en el rango visible tienen fuertes bandas de absorción óptica en el U.V. y en el I.R. Son los residuos de las bandas de absorción en el ultravioleta que presentan mayores efectos en la región 600-1500 nm para  $\lambda$  de transmisión. La absorción en el ultravioleta está relacionada con resonancias atómicas del oxígeno y cambia de acuerdo a la composición del

vidrio.

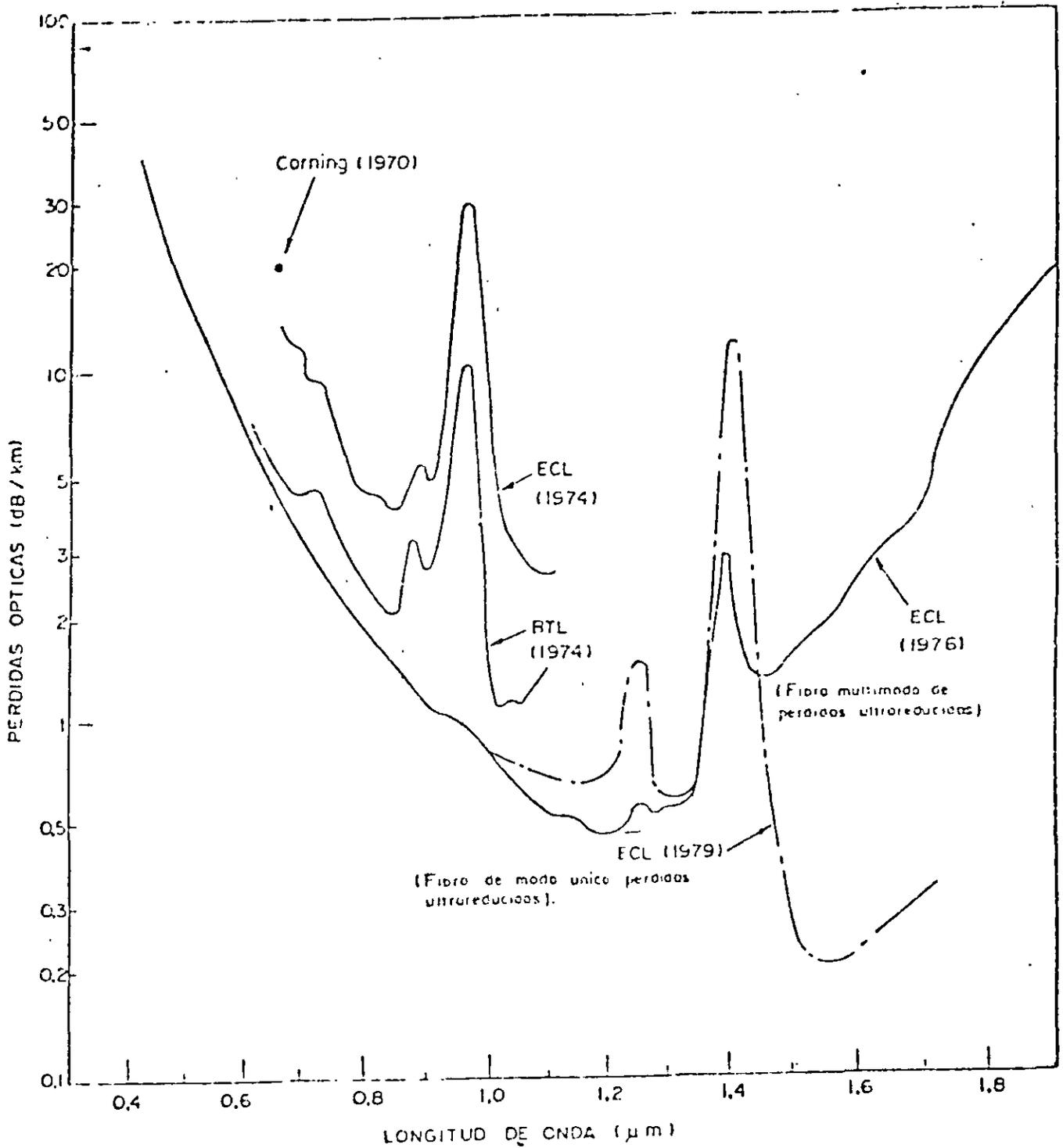
La absorción por impurezas se debe básicamente de la presencia de iones metálicos tales como hierro, cobalto y cromo. La absorción de estos iones varía de vidrio a vidrio dependiendo del estado de Valencia del ion. Introduciendo cantidades fijas de la impureza en un tipo de vidrio dado y calculando las pérdidas se pueden obtener datos para extrapolar a bajas concentraciones.

Se ha demostrado con este procedimiento que se requieren unas pocas partes por billon para lograr pérdidas menores de 20dBs/Km. La figura (2.3.7) muestra estas bandas para los iones  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , y  $\text{Fe}^{2+}$ . Se ve que la banda de absorción varía de elemento a elemento y varía también aunque no se ilustre esto, dependiendo del tipo de composiciones de vidrio utilizado; Por lo que la figura (2.3.7) debe tomarse más como ilustración que como una figura precisa.

Otra impureza importante es el agua que se presenta como iones  $\text{OH}^-$ . Estos contribuyen con picos de absorción angosto e intensos perfectamente identificados en 1370, 1230 y 950 nm. Estos son respectivamente el primero y segundo sobretonos y una combinación intermedia del tono fundamental de absorción en 2800nm.

Una constante carrera para disminuir la influencia de la absorción  $\text{OH}^-$  entre los fabricantes ha fijado límites de atenuación significativos en las regiones de 1.1-1.2 $\mu\text{m}$ , 1.3 $\mu\text{m}$  y 1.5 a 1.7 $\mu\text{m}$ , con un mínimo absoluto de 0.16 dB/Km obtenido en 1.5 $\mu\text{m}$ , donde las pérdidas intrínsecas de absorción son despreciables.

La dispersión o radiación en fibras ocasiona que un rayo dirigido de luz se disperse en una infinidad de rayos algunos de los cuales no son ya guiados por la fibra perdiéndose por lo tanto a lo largo de la trayectoria.



ECL : Electrical Communication Laboratory, NTT  
 BTL : Bell Telephone Laboratory  
 Corning : Trabajos realizados sobre vidrio por Corning

*PROGRESO EN LA REDUCCION DE PERDIDAS EN LA FIBRA OPTICA.*

FIGURA

Los mecanismos de dispersión son generados por fluctuaciones en el índice de refracción menores al tamaño de la longitud de onda de propagación. Estas fluctuaciones tienen dos causas básicas: fluctuaciones térmicas a lo largo del material y más importante, fluctuaciones en la concentración de los óxidos presentes en el vidrio. Estas fluctuaciones definen la denominada dispersión de Raleygh que es la misma presente en el cielo (por lo que se ve azul) y se definen por las fórmulas:

Para la dispersión por fluctuaciones de temp.

$$Z = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1) K T B \quad (2.3.20)$$

Donde: K = es la constante de Boltzman

T = es la temperatura

y B = la compresibilidad

Para la dispersión por fluctuación de densidad

$$Z = \frac{16\pi^3 n}{3\lambda^4} \left( \frac{\partial n}{\partial c} \right)^2 \overline{\Delta c^2} \delta V \quad (2.3.21)$$

Donde:  $\overline{\Delta c^2}$  = es la fluctuación de concentración media cuadrática

y  $\delta V$  = el volúmen en que ocurre.

Lo importante es la dependencia en el factor  $1/\lambda^4$  de ambos. Siendo la segunda ampliamente dominante con respecto a la primera, se miden sus efectos conjuntos analizando la cantidad de potencia óptica que sale de una fibra y marca un límite absoluto para la reducción en pérdidas.

La tercera causa de dispersión se debe a los efectos de la variación del índice de refracción radial de su valor teórico a lo largo de la longitud de la fibra. Su efecto en fibras de índice

gradual no puede ser estimado directamente ya que estas imperfecciones se confunden con las otras inhomogeneidades en el material. Para la fibra de índice escalonado estas variaciones se presentan como rugosidad en la frontera núcleo/cubierta a lo largo de la longitud y afectan de la misma manera que las microcurvaturas. En fibras monomodo donde estas irregularidades solo son críticas cuando tienen una longitud de onda espacial relacionada con la diferencia entre constantes de propagación del modo fundamental y el que le sigue, se puede detectar su efecto. Para fibras monomodo fabricadas con el método de disposición externa se ha logrado fibras con muy poca contribución de estos efectos y las pérdidas se aproximan mucho al límite fundamental dado por la absorción interna y la dispersión Rayleigh. La figura (2.3.8) muestra el espectro de pérdidas para la fibra monomodal mencionada y la figura (2.3.9) una descomposición de las pérdidas para una fibra de este tipo en sus elementos constituyentes.

El límite teórico como se ve, aproxima 0.16 dB/Km para la región  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

Das las características de las pérdidas por dispersión extrínsecas, es decir, debidas a los efectos de desviaciones geométricas o del índice de refracción, su efecto es un fenómeno estable solo después de que han recorrido una distancia suficiente en la fibra. Esta distancia, denominada distancia de correlación es la distancia a la cual la distribución de potencia entre modos alcanza una distribución uniforme, y los modos débiles se han perdido (ya que no cooperan en la transmisión larga distancia) y no serán medidas. Una prueba de atenuación para una fibra sólo puede ser confiable para esta distribución de potencia.

En lo general se usan varios métodos para lograr esta excitación estable sin necesidad de usar la longitud de fibra mencionada

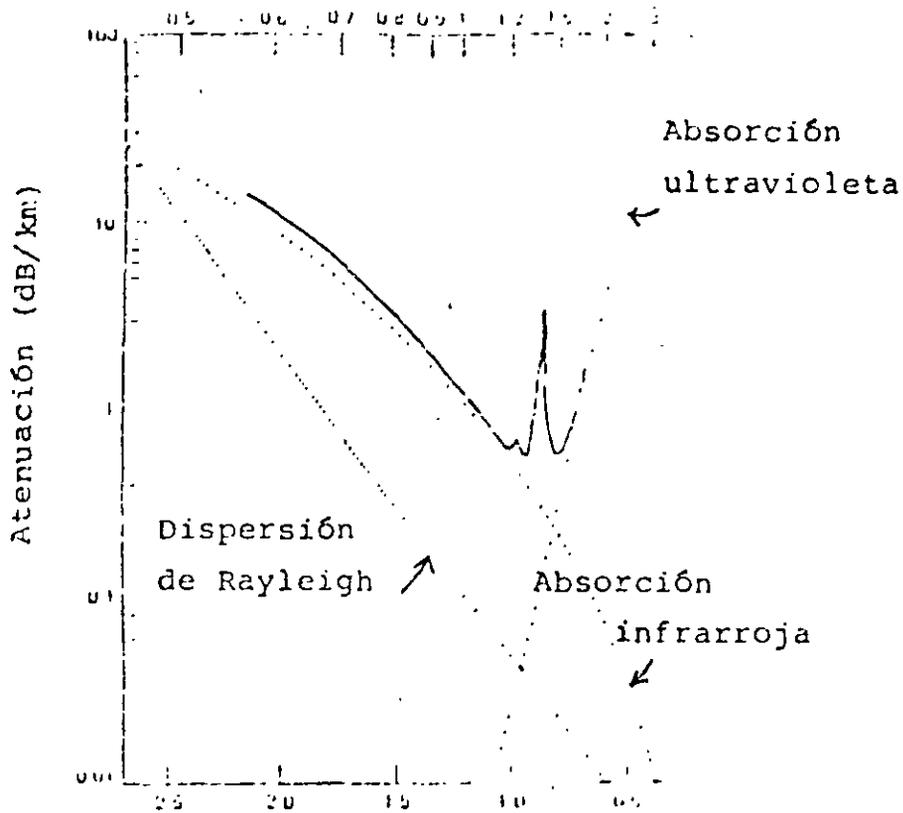


Figura (2.3.9).- Descomposición de pérdidas en absorción y dispersión.

TYPICAL SPECTRAL ATTENUATION RANGE: MG05 FIBER

ATTENUATION: (dB/km)

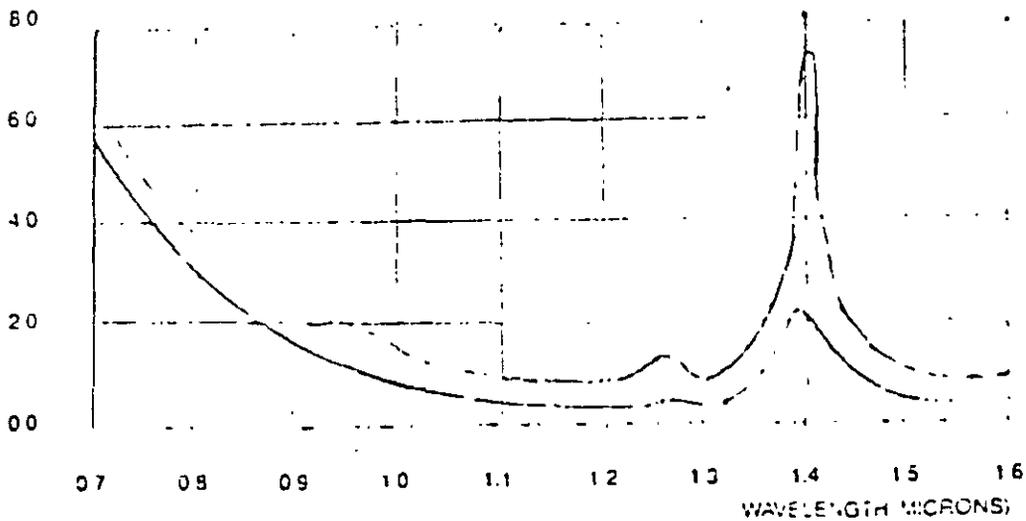
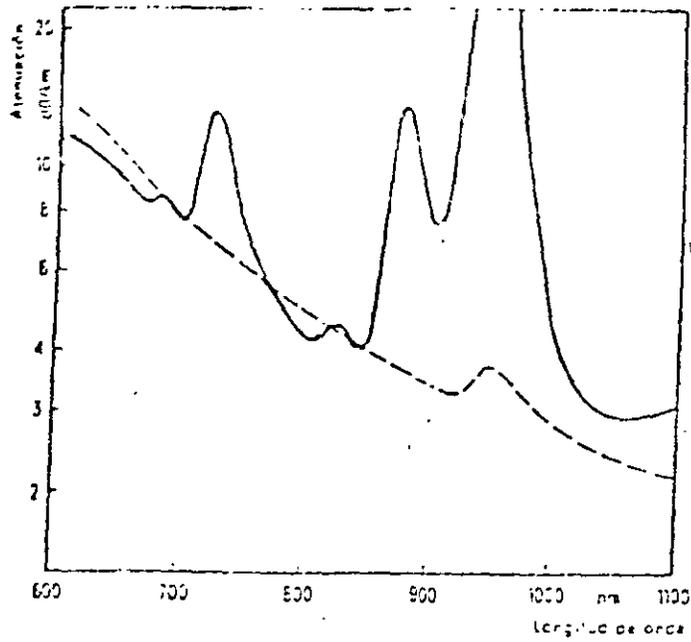


Figura (2.3.10).- Atenuación índice gradual. (VALTEC)



Ejemplos de la curva de atenuación medida  
 --- Cables con fibras sin agua a demanda  
 (No hay crestas de atenuación en el margen de 900 nm)

Figura (2.3.11).- Atenuación índice gradual (SIEMENS)

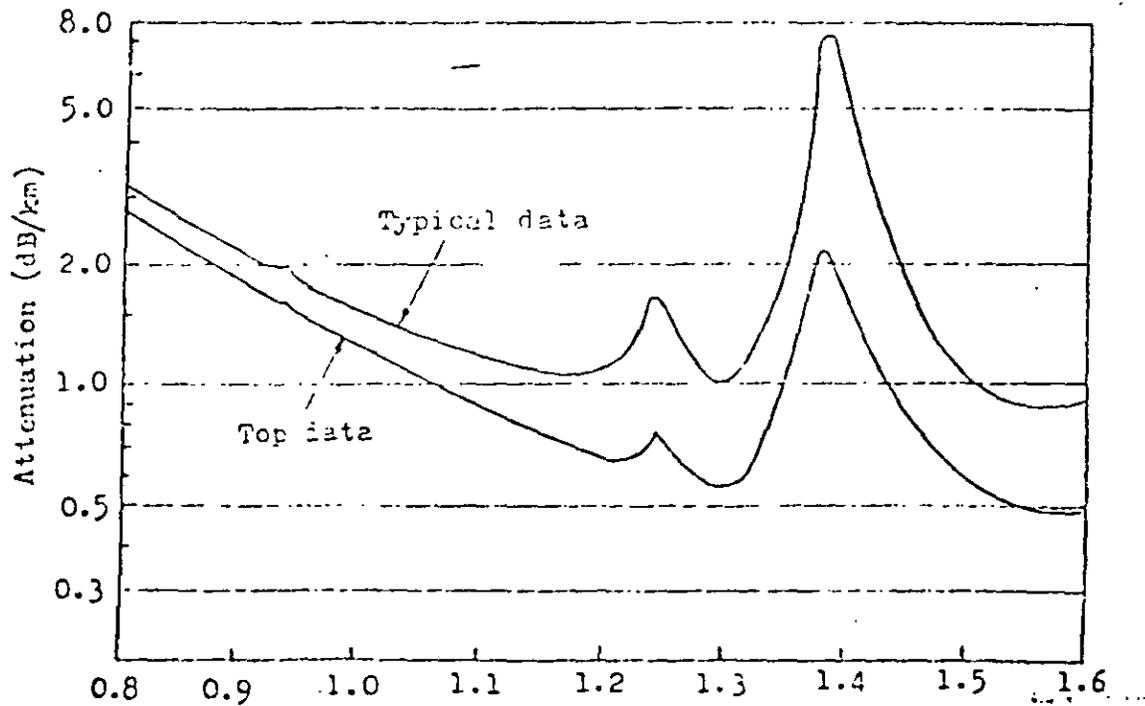


Figura (2.3.12).- Atenuación índice gradual (SUMITOMO)

JING

Telecommunications Products Department  
Corning Glass Works  
Corning, New York 14831  
Tel: (607) 974 4411  
Telex: 932499 (USA)

**Corning**<sup>®</sup>  
Optical Waveguide

Single Mode Fiber/SMF

SMF PRODUCTS FOR EXPERIMENTAL APPLICATIONS

Attenuation	$\lambda_c$	Price per meter (US \$)	
		1-10 km	10-100 km
4.0 dB/km @ 850 nm	< 800 nm	4.75/m	4.00/m
2.0 dB/km @ 1060 nm	< 950 nm	4.75/m	4.00/m
1.0 dB/km @ 1550 nm	< 1400 nm	4.75/m	4.00/m

Core Diameter: 4-12  $\mu\text{m}$   
Clad Diameter: 125  $\mu\text{m}$   
Coating: CPC (250  $\mu\text{m}$  O.D.)  
Screen Test: 50 kpsi  
Standard Length: 2.2 km

Figura (2.3.13).- Atenuación en una fibra óptica monomodal.

que es aproximadamente de 1Km.

Las figuras (2.3.10), (2.3.11), (2.3.12) y (2.3.13) muestran curvas de atenuación típicas es fibras multimodales y monomodales comerciales. Es interesante notar que no todas tienen la atenuación esperada de acuerdo a los avances de la tecnología y que los picos de absorción  $\text{OH}^-$  están más o menos limitados de acuerdo a la calidad de la fibra.

### 2.3.3.- Ancho de banda en fibras ópticas

La determinación de un parámetro de ancho de banda en las fibras ópticas no es trivial. Se complica básicamente por las siguientes razones:

- a) La dependencia del ancho de banda en tres factores de ensanchamiento de pulso denominados modal, intramodal y del material.
- b) La dependencia del ancho de banda en la forma del perfil de índice de refracción con respecto a su valor ideal perfil que en general es difícil de controlar en fabricación.
- c) La dependencia del ancho de banda en las microdesviaciones aleatorias sufridas por la fibra en su cableado e instalación.
- d) La dependencia del ancho de banda en la forma de la distribución espectral de la fuente de luz utilizada.
- e) La dependencia del ancho de banda en las condiciones de inyección de la luz en la fibra.

Si se van tomando en cuenta en forma consecutiva simplificaciones al caso general podremos reducir el tamaño de las fórmulas requeridas para la evaluación.

En general cada fibra en particular después de fabricada tiene una figura de dispersión modal intramodal y del material única y esta figura puede determinarse si se controlan las condiciones de inyección y la forma espectral y amplitud de la fuente usada. De esta figura puede obtenerse una medida comercial de ancho de banda utilizable en la especificación de sistemas.

La característica deseada es una excitación uniforme de los modos de propagación y existen varias formas para lograr esto; Estas se verán posteriormente.

Dadas las características de la medición, el fabricante al reportar sus resultados, elimina en lo posible el efecto de la fuente para que cada quien evalúe su ancho de banda de acuerdo a la fuente que utilice.

Estas consideraciones son particularmente importantes cuando se asocian fibras de diferentes características en una línea. El fabricante por otra parte debe medir esta respuesta cuando quiere optimizar un perfil de índice a una longitud de onda dada.

De acuerdo a la teoría de propagación sabemos que los fenómenos de dispersión en el pulso propagado provienen de efectos de guía de onda inter o intramodales, de efectos del material y finalmente de fenómenos de transferencia de potencia entre modos causados por imperfecciones en la geometría de la fibra.

Analícemos primero el caso de la fibra óptica ideal, es decir, sin imperfecciones geométricas. Tenemos en este caso tres efectos

de dispersión, dispersión modal, dispersión de guía de onda (intramodal) y dispersión del material. De ellos la dispersión del material y la de guía de onda son efectos cromáticos, es decir dependen del ancho espectral de la fuente. Sin embargo en las fibras ópticas multimodales, la dispersión del material es siempre mucho mayor que la dispersión de guía de onda y se puede despreciar a esta última.

Tenemos ahora dos efectos de dispersión uno independiente de la fuente (modal, y otro dependiente de la fuente (material). Cómo interactúan los dos efectos?

Las mediciones más precisas proponen un análisis considerando los dos efectos como dos procesos que actúan consecutivamente sobre el pulso inyectado. La figura (2.3.14) muestra esta simplificación.

### 2.3.3.1.- Efecto de dispersión Modal

De acuerdo a este modelo un impulso de dirac entrando al primer proceso distribuirá su potencia entre todos los modos de la fibra; como cada modo arribará a tiempo diferente al final de una cierta distancia L, la respuesta  $h_i(t)$  será una serie de impulsos espaciados en tiempo como lo muestra la figura (2.3.15)

Así para una potencia de entrada  $P_i(t)$  considerada por

$$P_o(t) = \sum_{n=1}^M P_n \delta(t - z_n); \quad P_i = \sum_{n=1}^M P_n \quad (2.3.22)$$

donde:  $P_n$  = es la potencia que lleva el modo n

$z_n$  = el retardo correspondiente al modo n.

Cuando el número de modos es muy grande se puede substituir la sumatoria por una

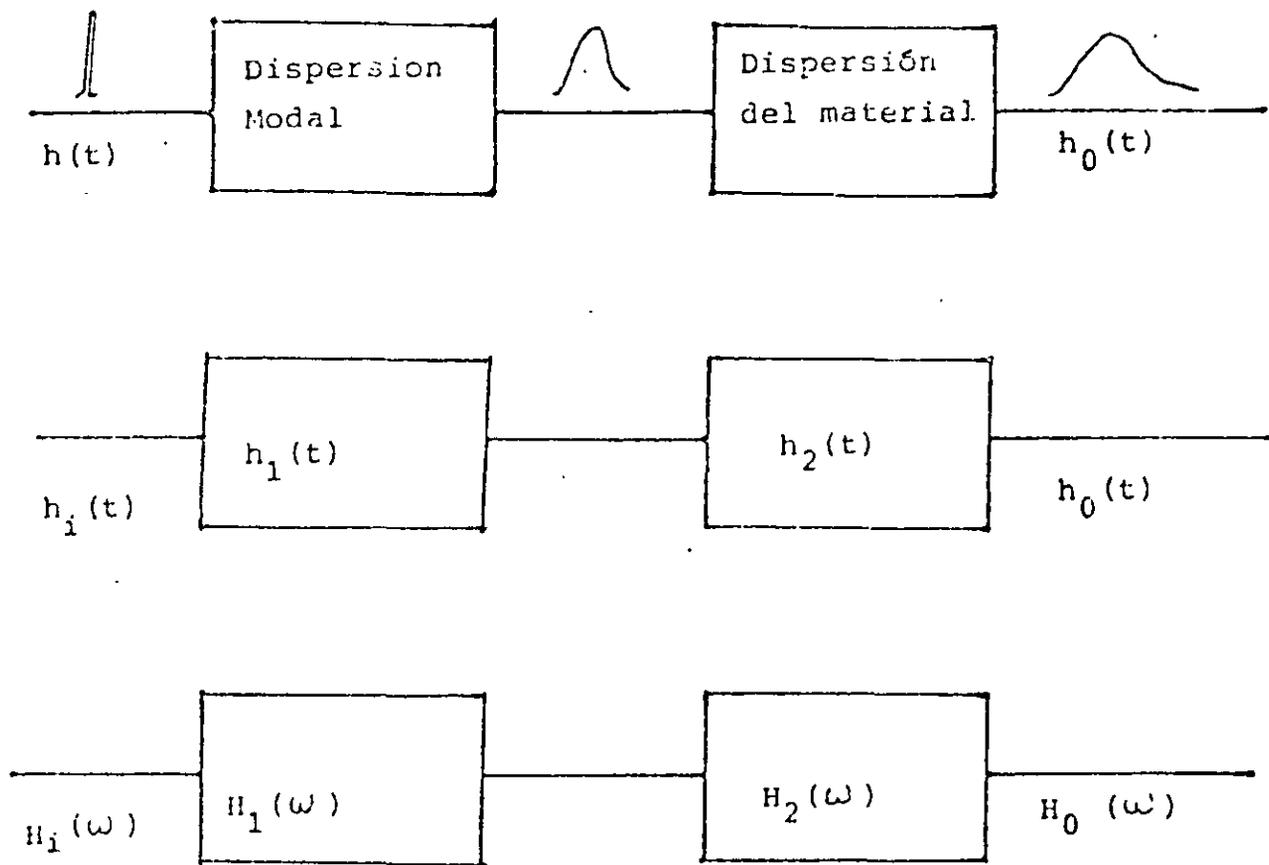


Figura (2.3.14).- Procedimiento de análisis de ancho de banda.

$$P_0 = P_n(\tau) = h_1(t) \iff H_1(\omega) \quad (2.3.23)$$

Esta será la respuesta al impulso de la dispersión modal y su transformada de Fourier determinará el ancho de banda para esta sección.

Por ejemplo, si suponemos que todos los modos se excitan por igual  $P_n = P_i/N$ , la llegada será una serie de impulsos de la misma amplitud cada uno con un tiempo de arribo particular  $\tau_n$ , y la respuesta al impulso será un pulso cuadrado con ancho igual a la dispersión intermodal; en este caso una fibra de índice escalonado.

$$\Delta \tau = \frac{n_1 \Delta}{c} L = \frac{(NA)^2}{2n_1 c} L \quad (2.3.24)$$

Así para:

$\Delta = 0.0018$	N.A. = 0.09	$\Delta \tau = 9$ ns/Km.
$\Delta = 0.005$	N.A. = 0.15	$\Delta \tau = 25$ ns/Km
$\Delta = 10.01$	N.A. = 0.21	$\Delta \tau = 50$ ns/Km

La transformada de Fourier de un pulso cuadrado determina directamente  $H_1(\omega)$ . Así normalizando el pulso para  $t=0$  en el centro del mismo la respuesta en frecuencia es:

$$H_1(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} e^{-j\omega t} dt = \frac{2 \sin(\pi \tau f)}{2\pi \tau f} \quad (2.3.25)$$

La figura (2.3.15) muestra estos casos

Las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  de la figura definen dos formas de caracterizar el ancho de banda  $f_2$  es el ancho de banda de 3dBs ópticos y corresponderá a una disminución de 6 dBs en la corrien



Figura (2.3.15).- Espaciamiento de impulsos modales

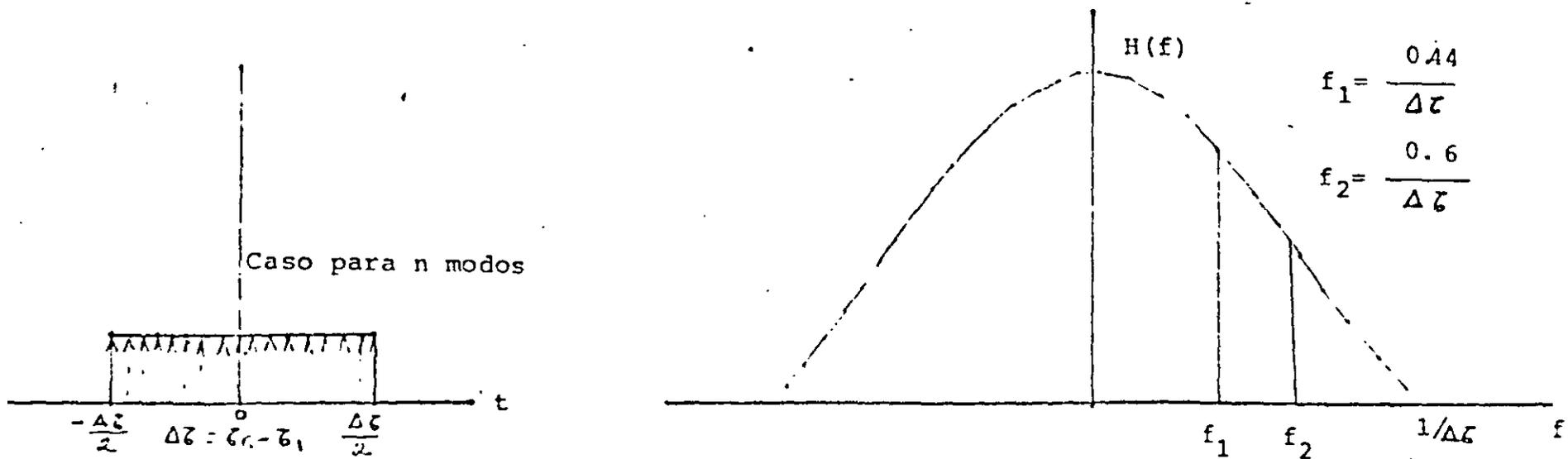


Figura (2.3.16).- Aproximación de la dispersión modal mediante un pulso rectangular de ancho  $\Delta z$  y su transformada de Fourier, indicando  $f_1$  (3 dB eléctricos) y  $f_2$  (3 dB ópticos).

te o voltaje de salida de un conversor  $f_1$  corresponde al ancho de banda de 3 dBs eléctricos tradicionalmente usada y corresponde a una caída en voltaje de  $1/\sqrt{2}$  de su valor en DC.

Es el valor  $f_2$  el que normalmente obtenemos en las figuras del fabricante dado para un Km. de longitud.

Ahora bien, tomando en cuenta el efecto de distribución de potencia en los modos, se ha demostrado que la forma del pulso de salida a una excitación modal se aproxima a una respuesta Gaussiana con desviación estándar dada por:

$$\sigma_{m_0} = \frac{L_1 \eta_1 \Delta}{2 c \sqrt{3}} \quad (2.3.26)$$

Esta distribución y su transformada de Fourier se aprecian en la figura (2.3.17) con los valores de  $f_1$  y  $f_2$  indicados.

Para el caso de una fibra de índice gradual óptima, donde el efecto modal es mucho menor, obtenemos también una distribución gaussiana pero ahora con desviación dada por:

$$\sigma_{m_0} = \frac{L_1 \eta_1 \Delta^2}{20 c \sqrt{3}} \quad (2.3.27)$$

En la práctica los valores se alejan de este valor teórico pero se sigue manteniendo la distribución gaussiana para lo que los valores  $f_2$  o  $f_1$  determinan completamente  $m$ . La figura (2.3.17) muestra el efecto.

Algunas veces la dispersión intermodal domina por completo a la dispersión material como es el caso de la fibra de índice escalonado cuando se usa con un laser, sin embargo en otros casos hay que considerar también el efecto del material y determinar  $h_2(t)$  y  $H_2(w)$ .

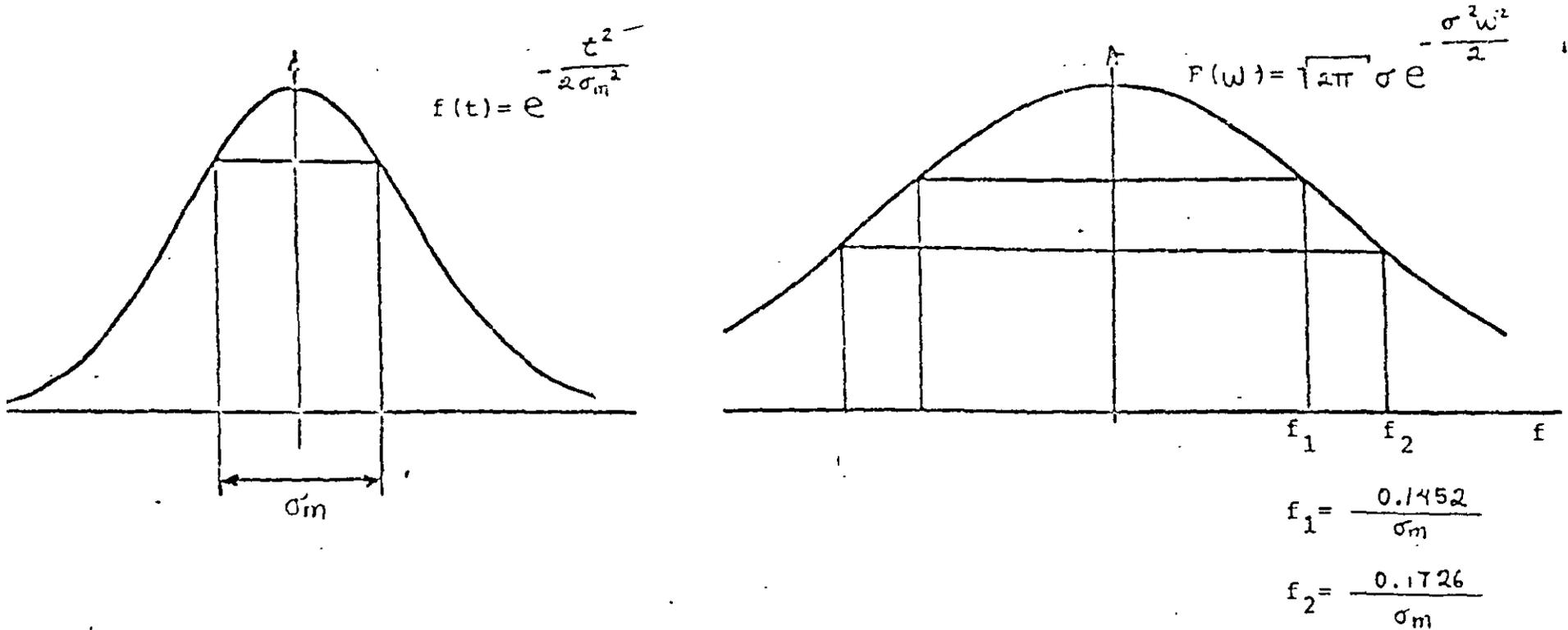


Figura (2.3.17).- Modelo Gaussiano para la dispersión intermodal.

$\sigma_m = \frac{L n_1 \Delta}{2c \sqrt{3}}$  para la fibra de índice escalonado (  $\sim 14.0$  ns )

$\sigma_m = \frac{L n_1 \Delta^2}{20c \sqrt{3}}$  para la fibra de índice gradual óptima (  $\sim 0.014$  ns )

### 2.3.3.2. Efecto de la Dispersión material

Para encontrar la respuesta al impulso  $h_2(t)$  en el efecto de la forma espectral del pulso supongamos una fuente con distribución espectral  $S(\lambda)$ . Un impulso de luz inyectado en un solo modo se ensanchará debido a que la potencia del impulso se distribuirá de acuerdo a  $S(\lambda)$  y cada longitud de onda viajará con una velocidad diferente y tendrá un tiempo de viaje  $\tau(\lambda)$ . La mayoría de las fuentes ópticas disponibles se pueden caracterizar por una distribución  $S(\lambda)$  gaussiana centrada en la longitud nominal de emisión  $\lambda_0$ ; su fórmula será:

$$S(\lambda) = S(\lambda_0) \exp^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{V_s} \right)^2} \quad (2.3.28)$$

normalizando  $S(\lambda)$  tenemos:

$$\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda = 1 \quad (2.3.29)$$

$\lambda_0$  será

$$\lambda_0 = \int_0^{\infty} \lambda S(\lambda) d\lambda \quad (2.3.30)$$

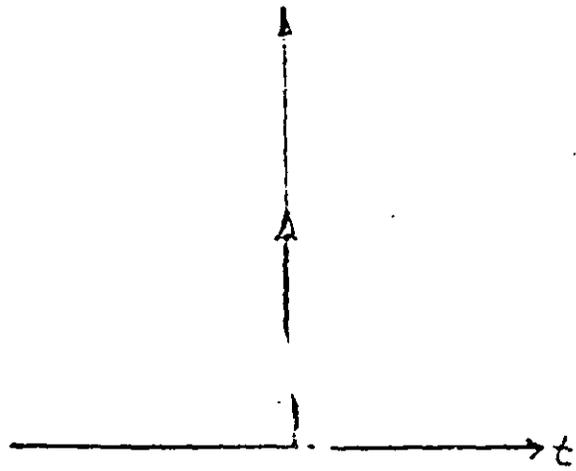
y  $V_s$  será

$$V_s = \left[ \int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_0)^2 S(\lambda) d\lambda \right]^{1/2}$$

De la teoría sabemos de un rayo de luz a una longitud de onda  $\lambda_0$  y con un pequeño ancho espectral  $\delta\lambda$  tendrá una dispersión alrededor de  $\lambda_0$ , en la fibra dada por:

$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \delta\lambda \quad (2.3.31)$$

$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda_0}{c} n''(\lambda_0) (\lambda - \lambda_0) \quad (2.3.32)$$



$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

$$\tau(\lambda) \Delta\lambda = L \frac{\lambda_0}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \bigg|_{\lambda = \lambda_0} \delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

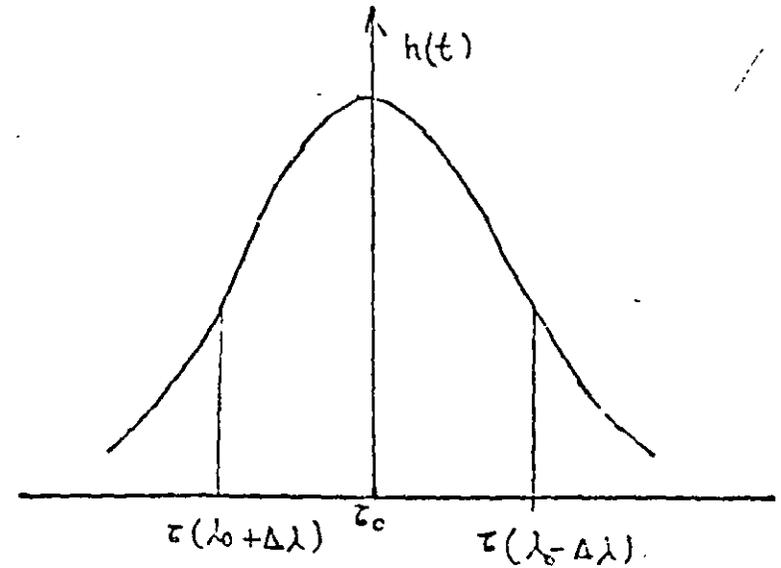
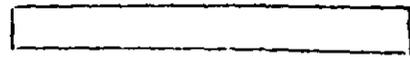
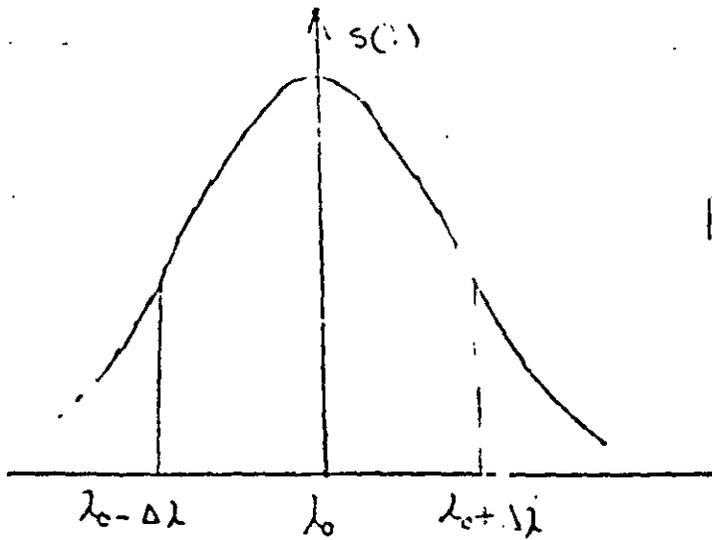


Figura (2.3.18).- Respuesta temporal de una fibra a una excitación con espectro  $s(\lambda)$ .

Si de acuerdo a esto distribuimos las velocidades de viaje de las diferentes longitudes de onda del emisor tendremos el efecto de la figura (2.3.12)

Por otra parte la potencia que arribará en  $\tau(\lambda_0 + \Delta\lambda)$  y en  $\tau(\lambda_0 - \Delta\lambda)$  serán proporcionales a  $S(\lambda_0 + \Delta\lambda)$  y a  $S(\lambda_0 - \Delta\lambda)$ . Es por esto completamente lógico pensar que la respuesta al impulso  $h_2(t)$  tendrá una forma igual a  $S(\lambda)$  pero mapeada al tiempo  $S(t)$ . Esto se expresa de la siguiente forma .

$$h_2(t) = S\left(\frac{t - \Delta\lambda}{z_m}\right) \iff S(\lambda - \lambda_0) \quad (2.3.33)$$

donde

$$z_m = L \frac{\lambda_0}{c} \left. \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right|_{\lambda_0} \delta\lambda = L M(\lambda_0) \delta\lambda \quad (2.3.34)$$

y  $\delta\lambda$  es el ancho espectral de la fuente.

Esta distribución será normalmente gaussiana.

Cuando el fabricante ofrece sus características de emisores indica generalmente el valor  $\lambda_0$  en que la respuesta cae a 1/2 de su valor en  $\lambda_0$ , respecto a esa medida:

$$\tau_s = 0.4247 \Delta\lambda_{1/2} \quad (2.3.35)$$

y para la dispersión temporal resultante  $\tau_c$  ( c de cromática)

$$\tau_c = \tau_s M = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \tau_s \quad ns/km. \quad (2.3.36)$$

La figura (2.3.19) muestra la respuesta al impulso y su transformada de Fourier  $H_2(\omega)$  para un laser semiconductor en  $0.85\mu m$ . con  $\Delta\lambda = 2nm$ ,

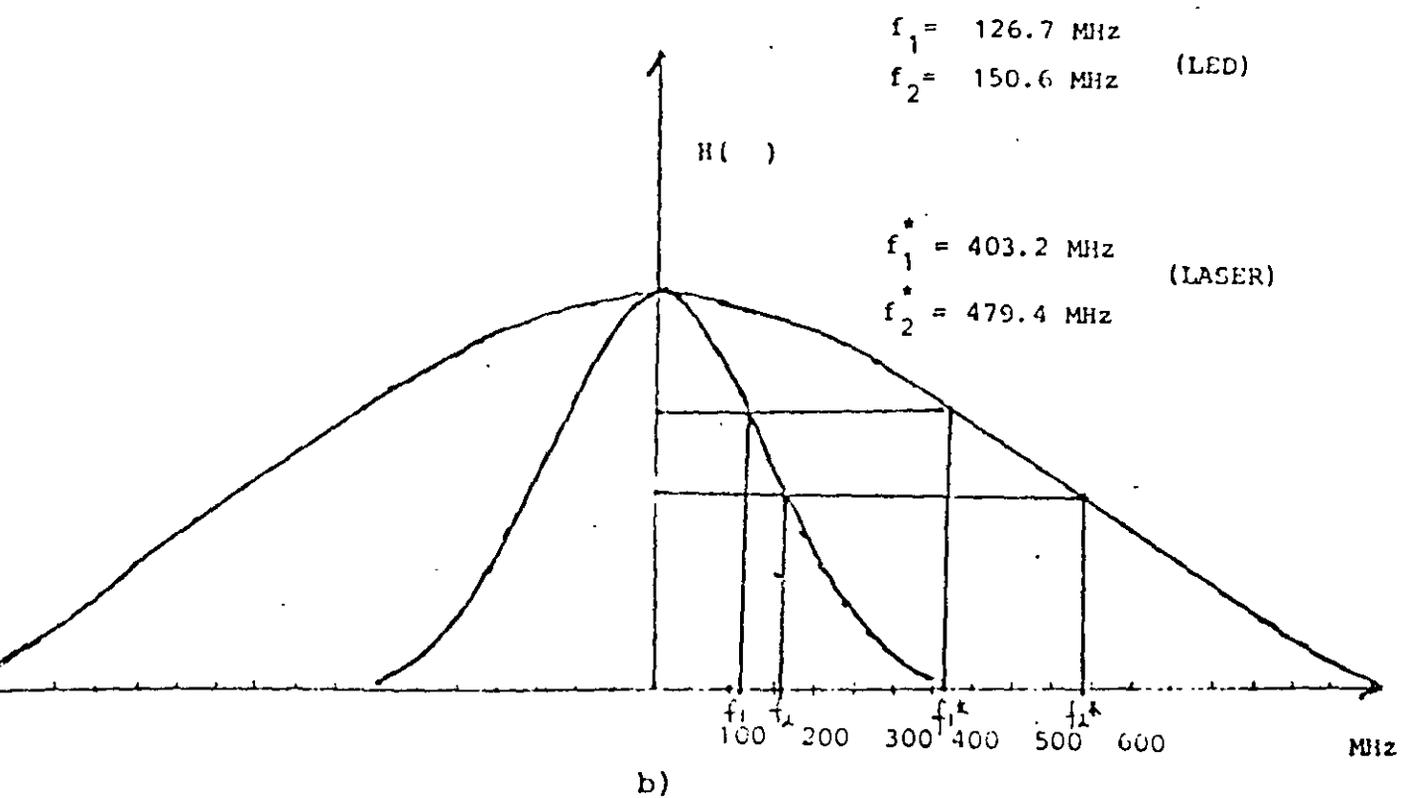
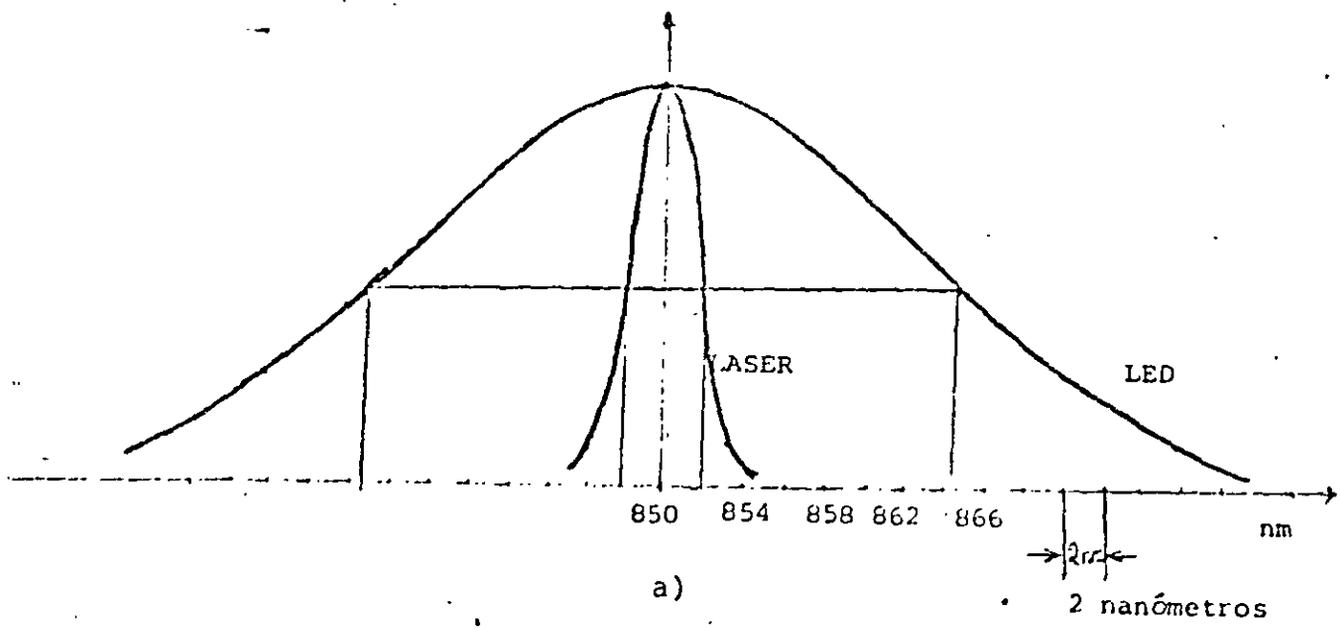


Figura (2.3.19).- Ancho espectral (a) y ancho de banda (b) para un LASER y un LED típicos.

El efecto conjunto de la dispersión material y modal es la convolución temporal  $(h_1(t) * h_2(t))$  o la multiplicación en la frecuencia  $H_1(\omega) H_2(\omega)$ .

Si lo vemos en dispersiones cuadráticas medias se puede decir que el pulso de salida de una fibra óptica es un pulso Gaussiano con dispersión media cuadrática  $\sigma_T$  dada por:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_c^2} \quad (2.3.37)$$

Donde

$\sigma_m$  = es la dispersión modal

$\sigma_c$  = es la dispersión cromática

O bien en anchos de banda de 3 o 6 dBs eléctricos.

$$\frac{1}{B_T} = \sqrt{\frac{1}{B_m^2} + \frac{1}{B_c^2}} \quad (2.3.38)$$

Donde

$B_m$  = es el ancho de banda de 3 o 6 dBs modal

$B_c$  = es el ancho de banda de 3 o 6 dB cromático

Ejemplo

Para una fibra de índice gradual óptica utilizada con un led de ancho espectral  $\Delta\lambda = 300 \text{ nm}$  y utilizando los valores de ancho de banda dados por el fabricante

a 820 nm

$M = 160 \frac{\text{p-sec}}{\text{nm-km}}$

$B_m = 600 \text{ MHz} \cdot \text{km}$

para el LED =  $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$

El último factor que es necesario considerar es el efecto de acoplamiento aleatorio entre modos cuyo efecto más evidente es alterar la dependencia del ancho de banda con la distancia.

El efecto es la equalización en los tiempos de viaje de los diferentes modos causada por los microdobles aleatorios a lo largo de la longitud. Esto hace que el ancho de banda no disminuya linealmente con la distancia sino de acuerdo a la relación.

$$B = B_0 L^{-\gamma} \quad (2.3.39)$$

Donde  $B_0$  es el ancho de banda a un Km. dado por el fabricante este efecto es puramente modal y no debe mezclarse con los efectos del material,  $\gamma$  es una medida de la mezcla entre modos y depende de la longitud de onda de trabajo siendo aproximadamente 0.7 para  $0.85\mu\text{m}$  y 0.85 para  $1.3\mu\text{m}$ .

#### 2.3.2.4.- Fibras concatenadas

Las fibras ópticas multimodales, principalmente las de índice gradual, tienen aún un problema sin resolver debido a su método de fabricación que es la variación de los anchos de banda obtenidos. Esto se debe a que desviaciones ligeras en la forma del perfil de índice de refracción causan cambios grandes en los anchos de banda. La figura (2.3.20) muestra este efecto. Al realizar longitudes de fibras mediante emplames es necesario un método para predecir el ancho de banda total.

El ancho de banda final depende de los anchos de banda individuales y la conversión de modos en las uniones.

Para fibras en que la regla de retardo es la misma en todas y no existe acoplamiento entre modos la dispersión modal se puede caracterizar como:

$$\sigma_T = \sum_{k=1}^N \sigma_k \quad (2.3.40)$$

$\sigma_k$  denota la dispersión modal de cada fibra y  $\sigma_T$  la dispersión total. Cuando existe un acoplamiento intensivo en tres modos la dispersión total es :

$$\sigma_T^2 = \sum_{k=1}^N \sigma_k^2 \quad (2.3.41)$$

En la realidad el ancho de banda toma un valor entre los dos.

Se han obtenido diversas fórmulas para obtener un resultado apropiado entre ellas

$$\sigma_T^2 = \sum_{k=1}^N \sigma_k^2 + \sum_{p=1}^N \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sigma_p \sigma_q \gamma_{pq} \quad (2.3.42)$$

Donde

$\gamma_{pq}$  = es el coeficiente de correlación entre las fibras p y q y se determina por parámetros estructurales imperfecciones de empalme y acoplamiento modal

Otra fórmula es:

$$B_T^{-1/8} = \sum_{k=1}^N B_k^{-1/8} \quad (2.3.43)$$

El problema se complica cuando las fibras concatenadas han sido optimizadas a diferente longitud de onda.

La figura (2.3.21) muestra el efecto de concatenado en diferente orden para un conjunto de 6 fibras con respecto a la distancia. Como se ve, pueden existir variaciones hasta de 250 Mhz en  $L=3\text{Km}$ .

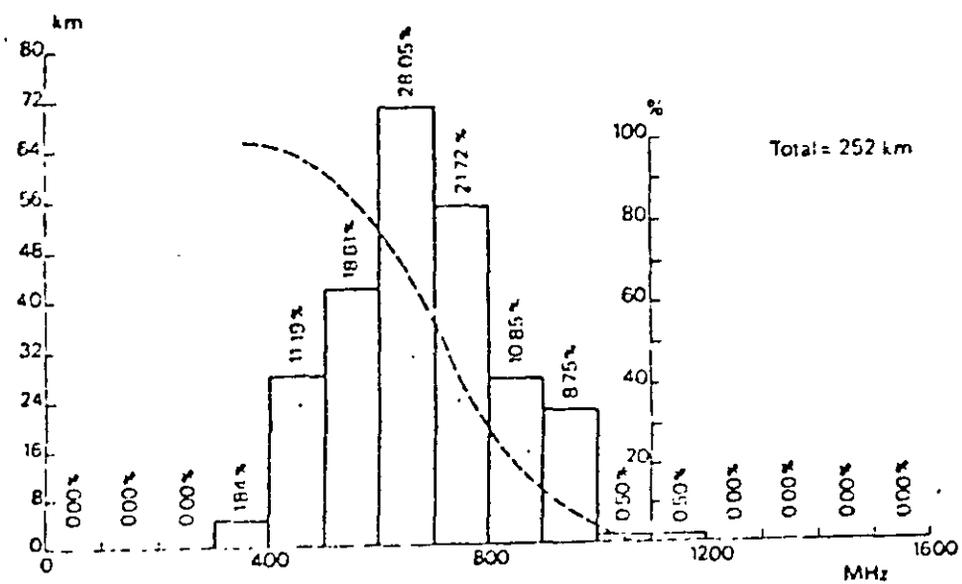


Figura (2.3.20).- Ancho de banda. Histograma.

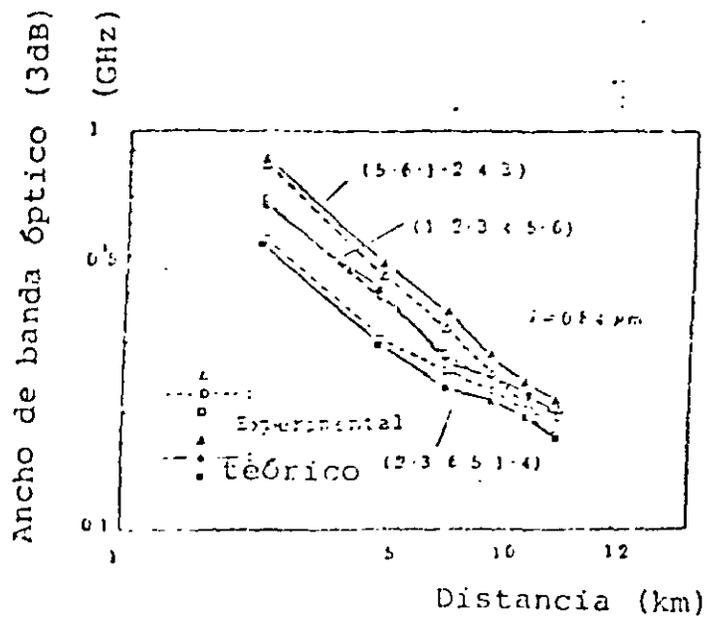
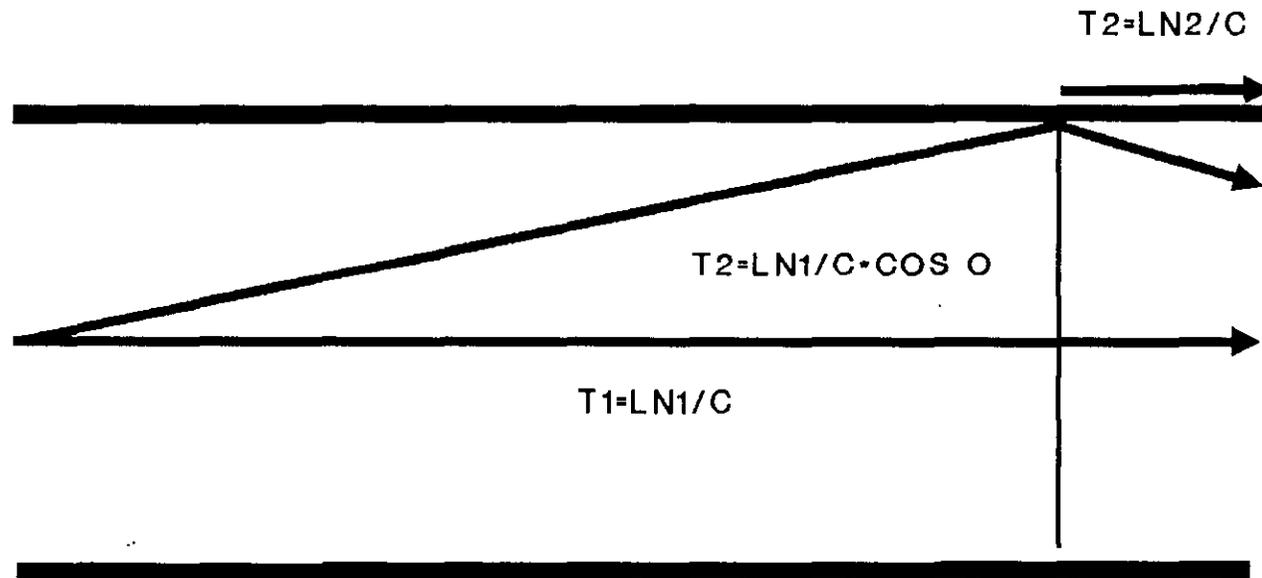


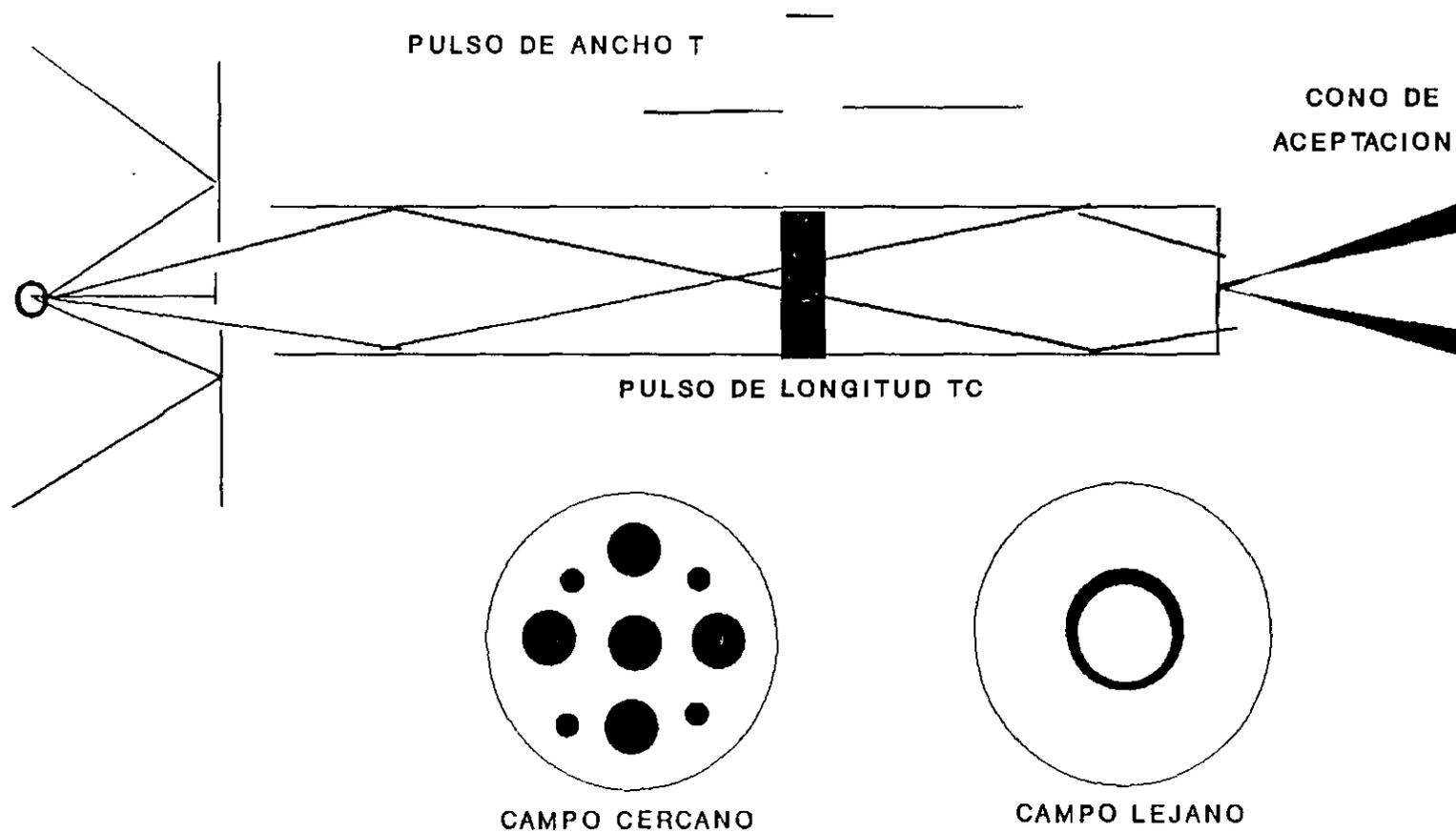
Figura (2.3.21).- Variación del ancho de banda total cuando se cambia el orden de las fibras concatenadas.

# DISPERSION INTERMODAL FIBRA MULTIMODO

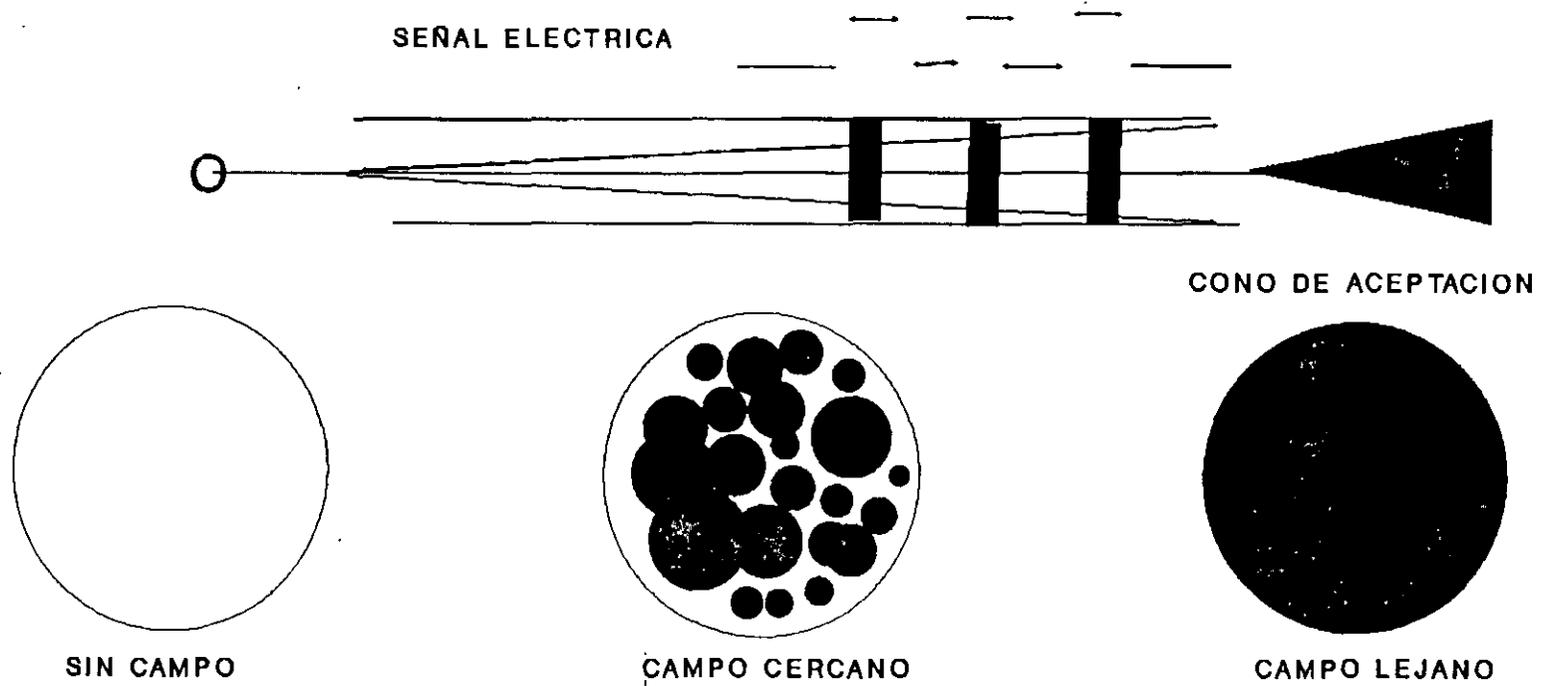


$$T_2 - T_1 = LN_1/C(1 - 1/\cos \theta) = L/C(N_1 - N_2) = LN_1 / C$$

# PROPAGACION F.O. MULTIMODO RESTRICCION A UN SOLO MODO

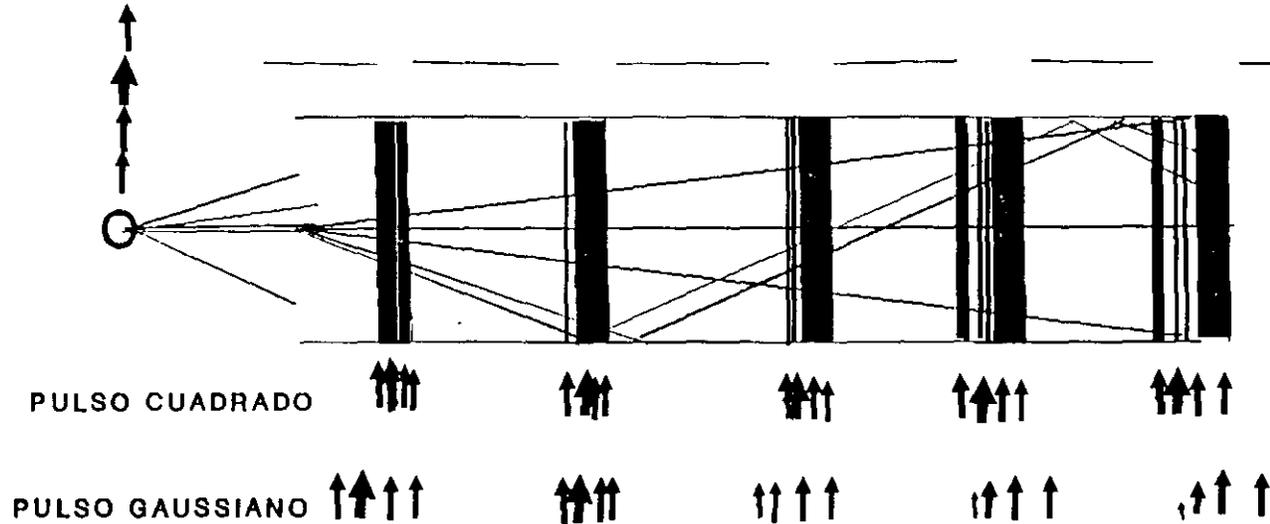


# PROPAGACION F.O. MULTIMODO EFECTO GLOBAL



# DISPERSION INTERMODAL F.O. DE INDICE ESCALONADO

ENSANCHAMIENTO DEPENDIENTE DE LA DISTANCIA

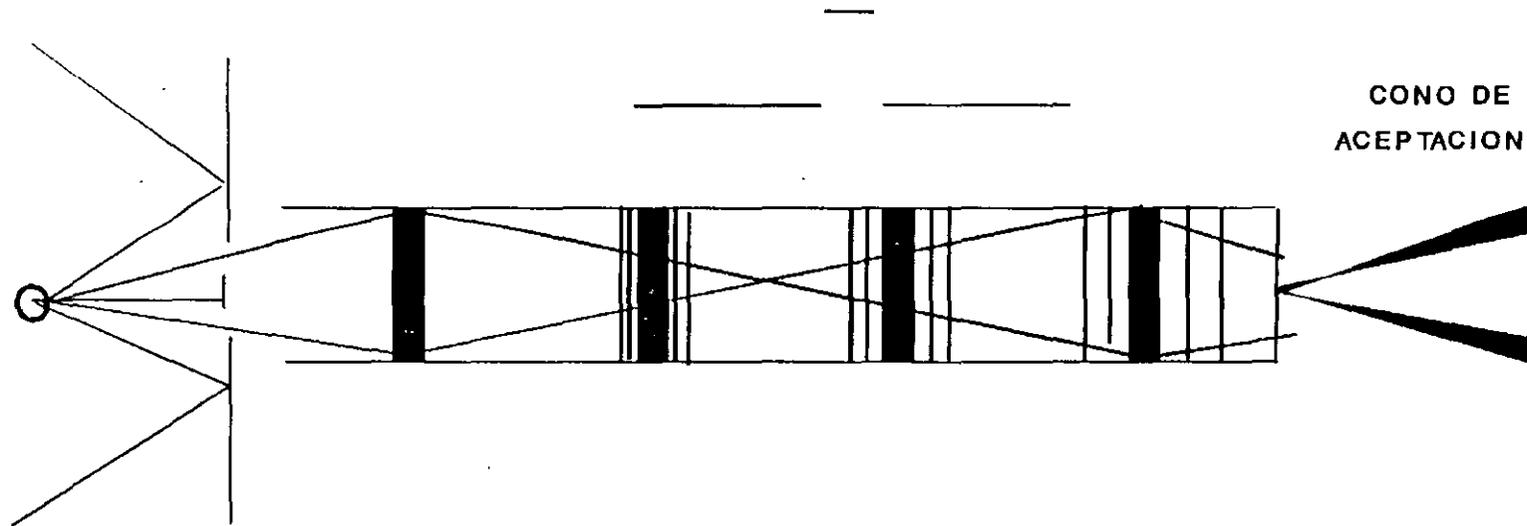


$$\text{FACTOR DE DISPERSION I. M.} = (L/C) \cdot (N_1 - N_2) = Q$$

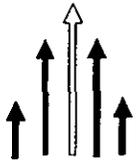
$$\text{PARA EL PULSO CUADRADO } T = \sqrt{Q \cdot t/2}$$

$$\text{PARA EL PULSO GAUSSIANO } F(t) = \text{EXP}(t^2 / 2Q^2)$$

# DISPERSION CROMATICA PARA UN SOLO MODO



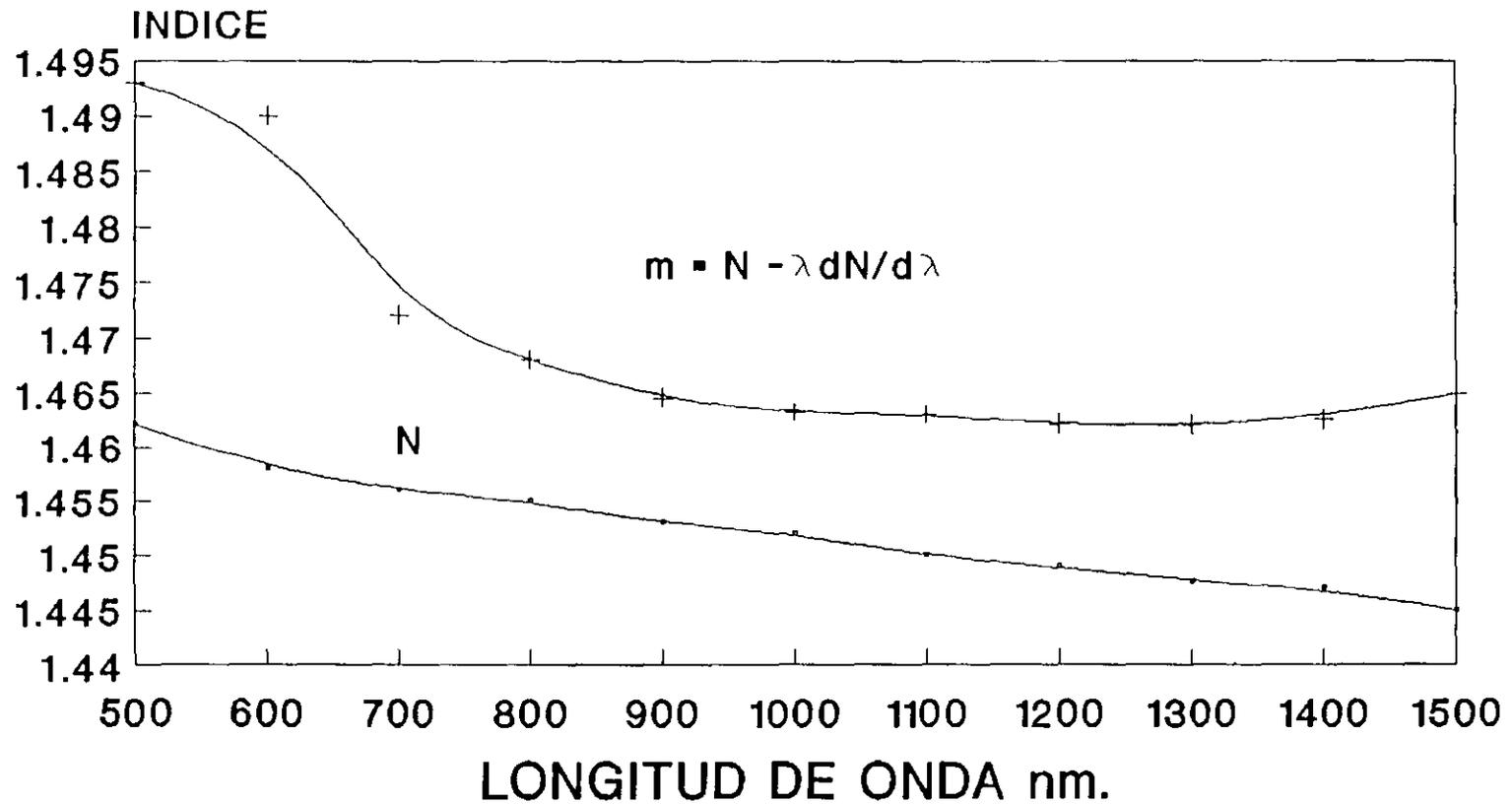
VELOCIDAD DE PROPAGACION EN FUNCION DE  $\lambda$



COMPOSICION

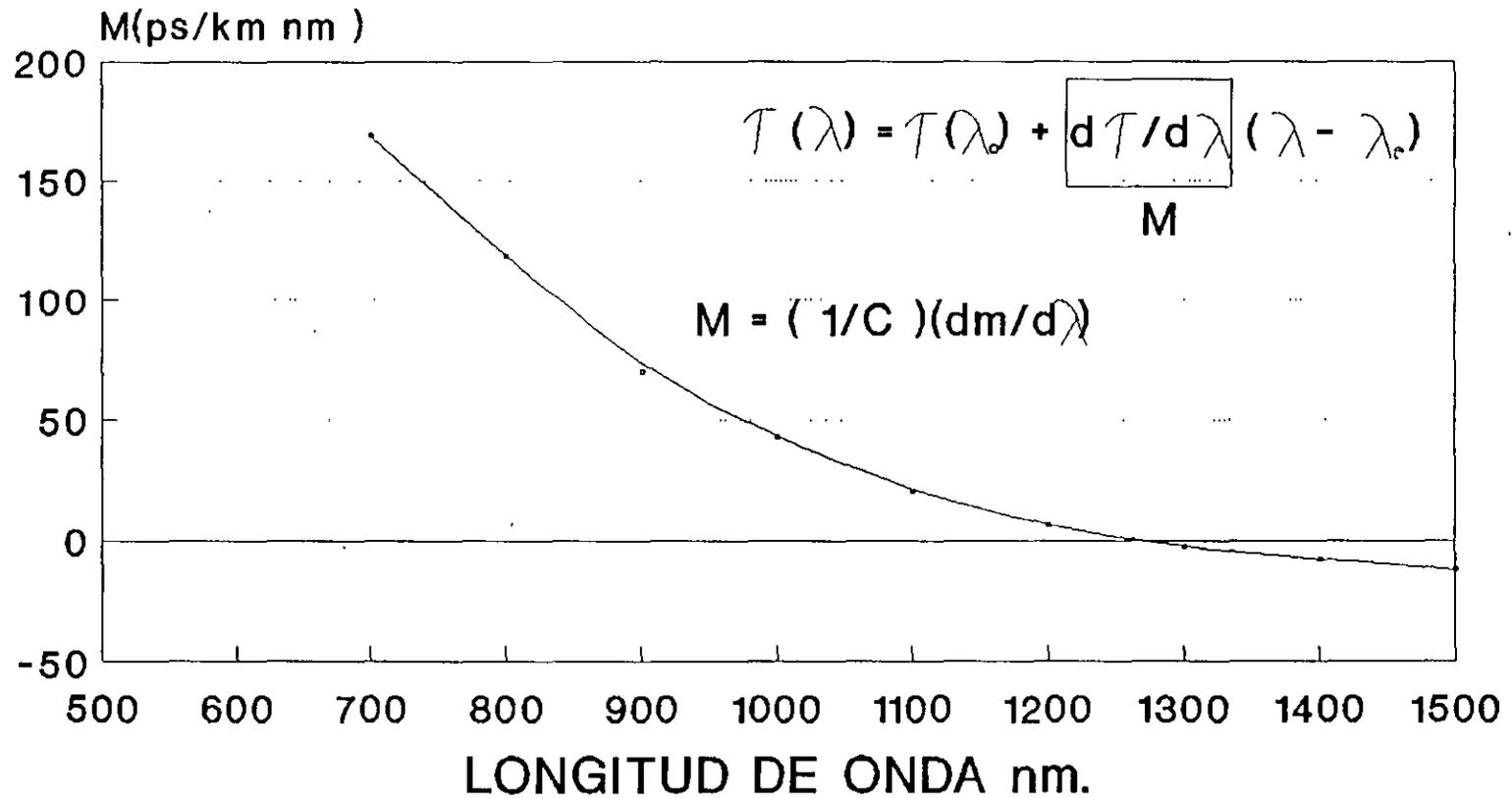
ESPECTRAL DELA FUENTE

# VARIACION DEL INDICE DE REFRACCION m Y n EN FUNCION DE LA LONG. DE ONDA



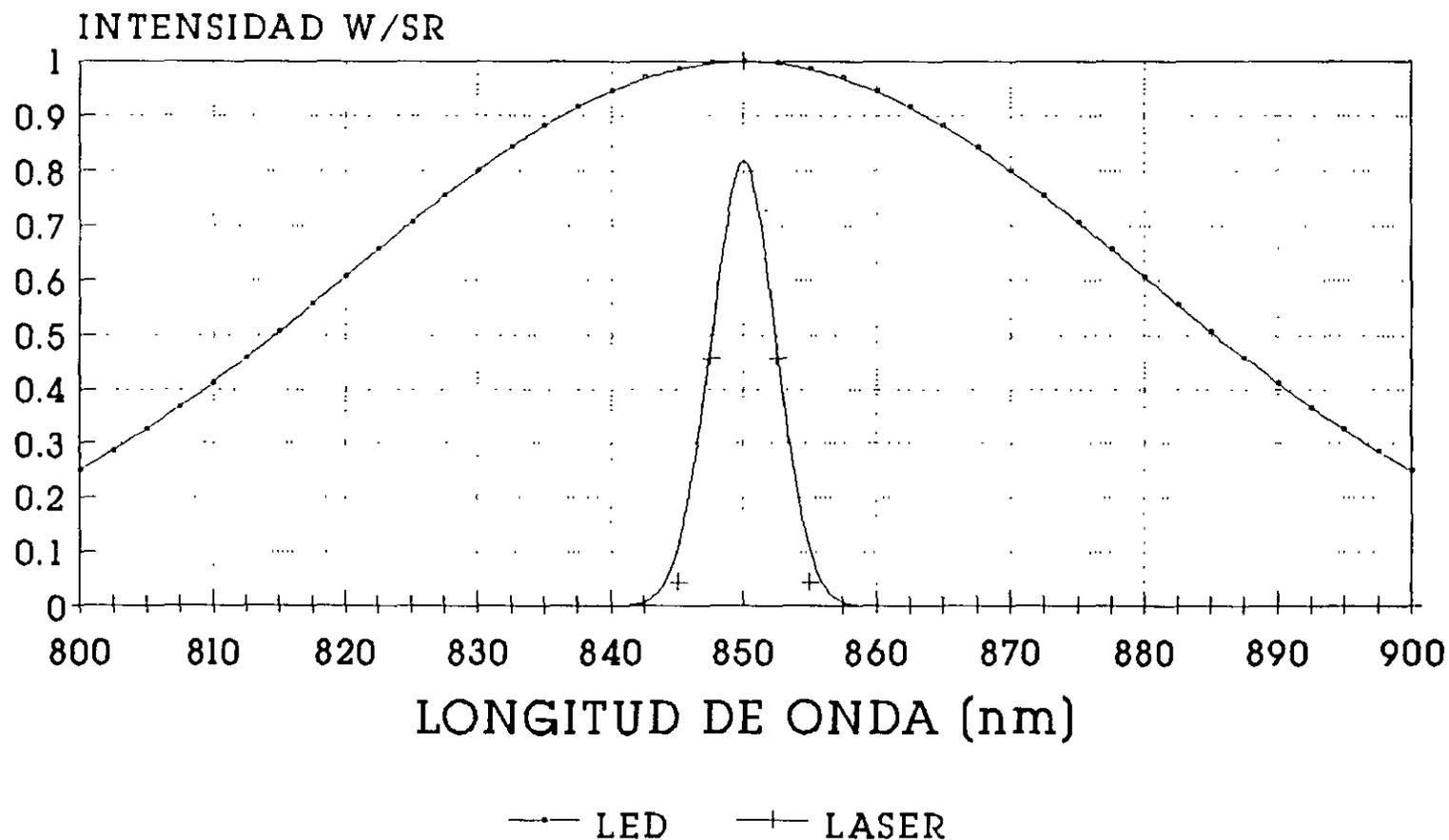
—●— INDICE DE REFRACCION    —+— INDICE EFECTIVO

# FACTOR DE DISPERSION DEL MATERIAL EN FUNCION DE LA LONG. DE ONDA

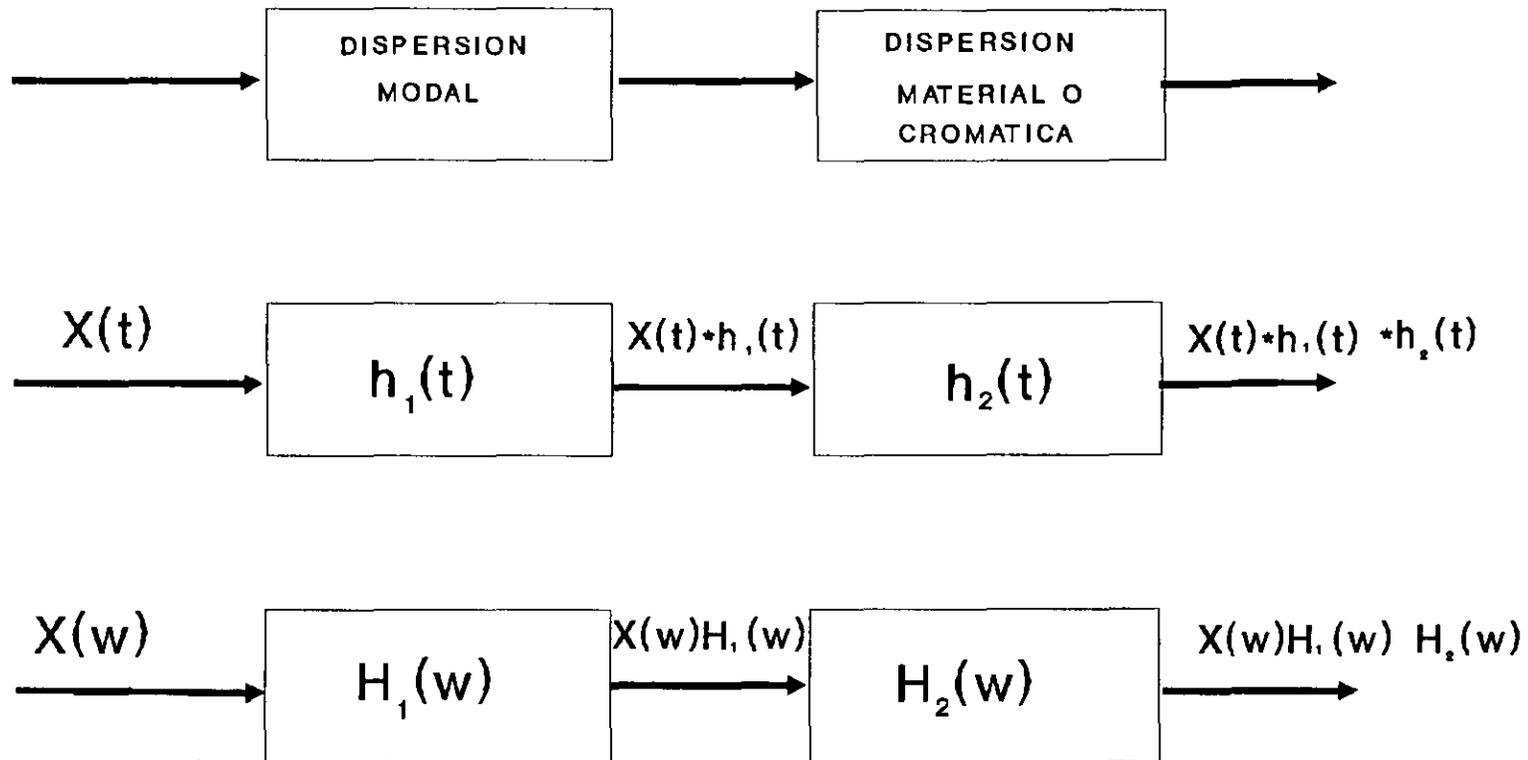


—•— M

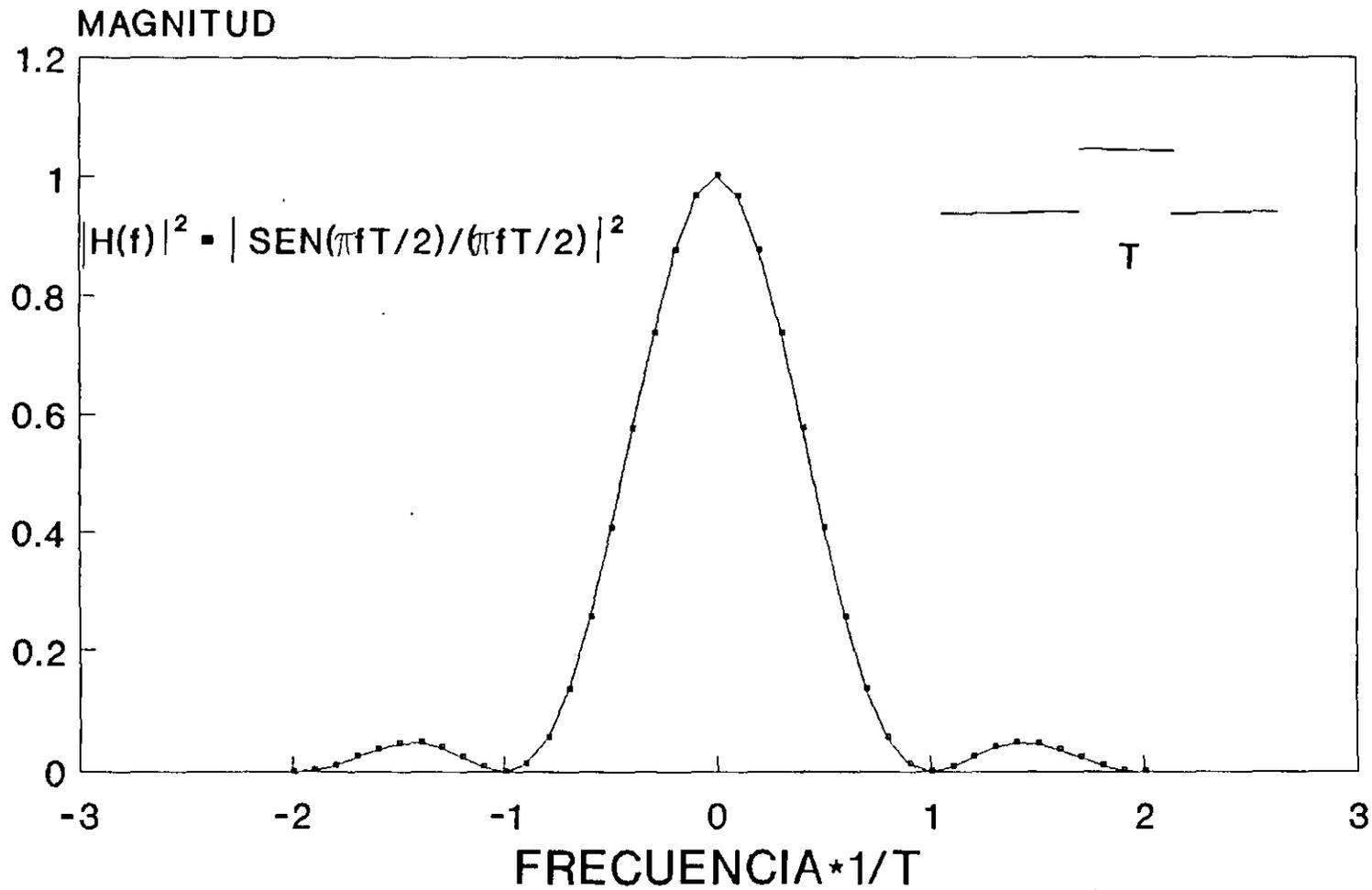
# ESPECTRO DE EMISION DIODO LASER Y LED



# MODELO PARA EL ANALISIS ANCHO DE BANDA

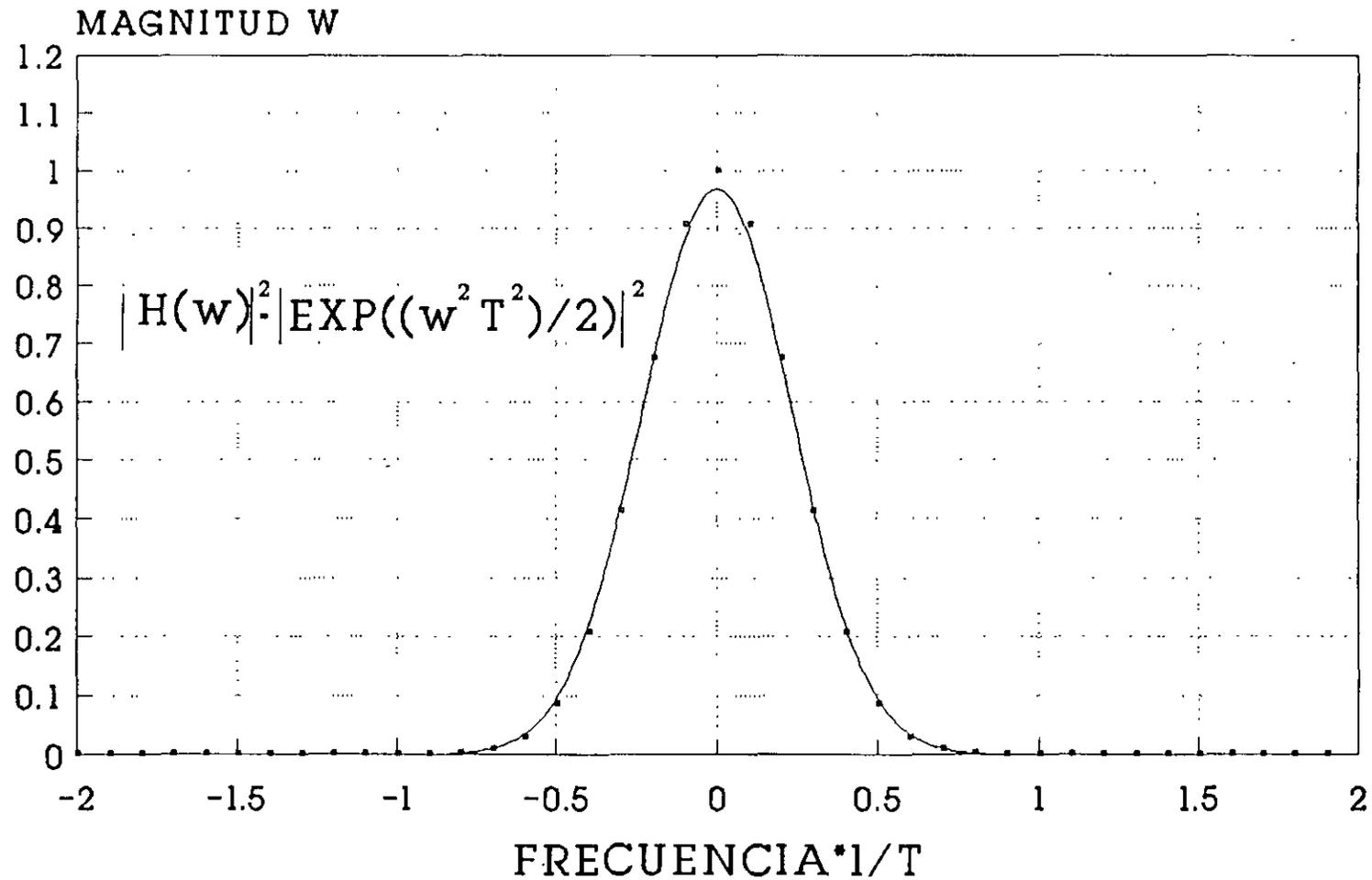


# RESPUESTA EN FRECUENCIA PULSO CUADRADO DE SALIDA



T ES EL ANCHO DEL PULSO DE SALIDA

# RESPUESTA EN FRECUENCIA PULSO GAUSSIANO



T ES LA VARIANZA DEL PULSO DE SALIDA

# METODOLOGIA DE DISEÑO DE UN ENLACE DE COMUNICACION POR FIBRAS OPTICAS.

## Introducción

Una vez analizado el funcionamiento de cada uno de los componentes de un sistema de comunicación por fibras ópticas, se procede a determinar de que manera se tiene como resultado un sistema que cubra las necesidades de comunicación para una aplicación particular. Para ello se sigue un proceso de diseño que consiste en contraponer los requerimientos de un usuario con las características que puede ofrecer el estado actual de la tecnología de comunicación por fibras ópticas. Generalmente, éste será un trabajo de ensayo y error que permitirá conocer, finalmente, si es posible o no la realización de un sistema práctico y en caso afirmativo, cuáles deben ser las características de los componentes de dicho sistema y, tal vez, las modificaciones que el usuario tenga que hacer a sus requerimientos.

En este capítulo se presentará la descripción de los parámetros principales que deben considerarse en un enlace de comunicación por cable óptico, la interrelación entre ellos; de manera general la metodología de diseño como una herramienta de planeación y por último, se discutirán varios ejemplos representativos de diseño.

## 1 Elementos Principales en el Proceso de Diseño

Los elementos o parámetros principales de diseño se pueden dividir en los grupos siguientes:

- De entrada                   o    requerimientos del usuario
- Intermedios                 o    cálculos principales
- De salida                    o    resultados de diseño

y a continuación se hace un breve análisis de cada uno de ellos.

### Requerimientos del usuario

Los requerimientos que se consideran más significativos para el diseño de un sistema de comunicación por fibra óptica son:

- Distancia
- Tipos de datos (Analógicos o digitales)
- Ancho de banda del canal o velocidad de Transmisión
- Calidad deseada en la Transmisión (SNR o BER)

Por supuesto, existen otros parámetros que deben considerarse en el diseño final tales como el costo, confiabilidad, tamaño, peso, medio ambiente y alimentación. Sin embargo, los requerimientos -- que se mencionan involucran las limitantes más importantes del sistema y determinan la factibilidad de realización del enlace de comunicación.

La utilización de un sistema de transmisión digital o uno analógico dependerá de cual de las dos presente mayores ventajas tanto, técnicas como económicas para una aplicación específica, por ejemplo: un sistema de comunicación que implique el manejo de una gran cantidad de canales de voz con un mínimo de ruido e interferencia favorece el uso de técnicas digitales de transmisión tales como el PCM. Sin embargo, si lo que se requiere es un enlace de video, un sistema de transmisión analógico representaría menos problemas de complejidad y costo que un sistema digital.

La capacidad de transmisión de información se especifica como ancho de banda en hertz cuando se emplea modulación analógica y como velocidad de transmisión en bits/seg en modulación digital. De la misma manera, los términos en que se expresa la calidad deseada en la transmisión son función del sistema que se utilice. Básicamente, en sistemas analógicos se tiene la relación señal a ruido, y en sistemas digitales la probabilidad de error.

La Relación Señal a Ruido (SNR) es la razón de la amplitud de una señal deseada a la amplitud de las señales de ruido en un punto - determinado, se expresa en decibeles y generalmente se usa el valor pico para el ruido impulsivo y el valor RMS para ruido eleatorio.

La probabilidad de error o tasa de bits erróneos (BER) está dada por la razón de bits identificados incorrectamente, al número total de bits transmitidos. En aplicaciones de fibra óptica, un valor típico de BER es  $10^{-9}$ .

Los factores de distancia y capacidad de transmisión son esenciales en el diseño por que determinan, practicamente, el sistema de comunicación por fibras ópticas que va a utilizarse y si es necesario, además, el uso de repetidores ópticos. Estos dos factores tienen que ver directamente con las dos limitantes de los siste--mas de comunicación por fibras ópticas: la atenuación y la dispersión.

En las fibras ópticas pueden considerarse los siguientes rangos de distancias:

- Corta distancia ( $\ell < 1\text{km}$ )
- media distancia ( $1\text{km} < \ell < 30 \text{ km}$ )
- larga distancia ( $\ell > 30 \text{ km}$ )

Atendiendo a cada una de ellas, puede proponerse la calidad de la fibra, el tipo de emisor y fotodetector, así como la separación y número de repetidores que resulten más adecuados.

### Cálculos Pricipales

Los cálculos principales en el diseño de un sistema de comunica--ción por fibra óptica están relacionados a las dos limitantes mencionadas, de tal forma que los valores permisibles de atenuación- y dispersión puedan conocerse en base a los requerimientos y resultados de diseño propuestos.

Esencialmente, el cálculo de la atenuación se realiza mediante la suma de las componentes siguientes:

- La atenuación en la fibra óptica a la longitud de onda de transmisión utilizada.
- Las pérdidas por acoplamiento, de la fuente de emisión a la fibra óptica y de la fibra óptica al fotodetector.
- Las pérdidas en los emplames necesarios para unir dos secciones de fibra óptica.

En base a lo anterior la separación máxima entre equipos terminales o entre repetidores L, considerando únicamente la limitante de atenuación, puede expresarse por:

$$\alpha L + k a_j = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) \quad (1)$$

donde:

$\alpha$  es la atenuación en la fibra (dB/km)

$a_j$  es la pérdida por empalme promedio (dB)

$P_t$  es la potencia acoplada a la fibra óptica (watts)

$P_r$  es la potencia mínima requerida en el receptor (watts)

La dispersión, a su vez, depende de:

- La longitud de onda de transmisión
- El tipo de graduación del índice de refracción, ya sea parabólico o escalonado
- La apertura numérica
- El ancho espectral de la fuente de emisión.

La dispersión llega a ser significativa cuando la distorsión por retardo del pulso transmitido, llega a ser lo suficientemente grande como el intervalo entre bits. Eventualmente, después de un cierto límite, cualquier incremento en la velocidad de transmisión causa una disminución en el espaciado entre repetidores. Este límite de dispersión puede ser estimado por la ecuación:

$$\sigma_{tot} L = 0.25 T = \frac{1}{4f_0}$$

donde:

$\sigma_{tot}$  es el valor cuadrático medio de la distorsión por retardo por unidad de longitud

En la fórmula anterior, se ha supuesto que la dispersión aumenta linealmente con la longitud de la fibra L. Sin embargo, el fenómeno de acoplamiento entre modos, reduce en alguna extensión el problema de dispersión por lo que los resultados prácticos son mejores que los resultados obtenidos teóricamente.

Debe considerarse, además, los componentes de este ensanchamiento, como son el ensanchamiento debido a la dispersión modal y el ensanchamiento cromático ocasionado por la dispersión del material:

$$\sigma^2_{tot} = \sigma^2_{mod} + \sigma^2_{crom} \quad ( 3 )$$

A partir de las ecuaciones (2.1) y (2.2) puede estimarse la frecuencia límite de modulación ( $f_{lim}$ ), más allá de la cual, el enlace de la fibra está limitado por dispersión.

$$f_0 > f_{lim} = \frac{\alpha}{4\sigma_{tot}} \left( \frac{1}{10 \log \frac{P_t}{P_r} - k_{aj}} \right) \quad ( 4 )$$

### Resultados de diseño

Los resultados de diseño son condicionados por los requerimientos del usuario y los cálculos principales. Estos resultados de salida definen las características de los elementos del sistema de comunicación:

- Subsistema Transmisor
- Cable Optico
- Subsistema Receptor

Para el subsistema transmisor deben considerarse:

- La longitud de onda de transmisión.
- La potencia de la fuente.
- El ancho espectral de la fuente, lo que determinará si se utiliza un diodo emisor de luz (LED) o un diodo Laser de inyección (ILD).

Para la fibra óptica:

- La atenuación espectral
- El perfil del índice de refracción ( gradual o escalonado)

Y finalmente para el subsistema receptor:

- La sensibilidad.

El término Sensibilidad se refiere a la potencia óptica mínima a la entrada del receptor requerida para lograr la relación Señal - a Ruido o la probabilidad de error deseada. De este factor, dependerá el tipo de fotodetector que será utilizado; ya sea fotodiodo PIN o fotodiodo avalancha APD.

#### Interrelación entre los Parámetros Principales.

En la fig. ( 1 ) se muestra la interrelación existente entre los parámetros anteriormente descritos con el fin de mostrar las características principales del proceso de diseño de un enlace óptico de comunicación.

Por ejemplo, si tomamos como base el diseño en el receptor vemos que éste se ve influido por :

- La potencia óptica disponible
- La longitud de onda
- El ancho de banda de la información

Luego, la potencia óptica recibida se determina por:

- La potencia óptica de la fuente.
- Las pérdidas totales del enlace.

Las pérdidas totales del enlace se dividen en:

- Pérdidas por acoplamiento.
- Pérdidas en la transmisión.

Por otro lado, las pérdidas por acoplamiento están dadas por:

- Características de la fuente
  - Area de radiación efectiva
  - Perfil de emisión
- Características de la fibra
  - Apertura Numérica
  - Area de radiación efectiva
  - Índice de refracción del núcleo

Y las pérdidas en la transmisión están determinadas por:

- Características de atenuación espectral de las fibras
- Longitud de onda
- Pérdidas por empalme
- Distancia entre la fuente y el detector.

De lo anterior se desprende que, el proceso de diseño de un enlace de comunicación por fibras ópticas es un problema que involucra muchas variables y que puede llevar varios ensayos antes de completarse, ya que la selección de un elemento final (transmisor, receptor o cable óptico) afectará la selección de los otros dos. Generalmente, es necesario suponer las características de ciertos elementos del sistema y entonces proceder de manera sistemática a interrelacionar y redefinir los elementos restantes.

En los puntos siguientes se proporcionan los diagramas de flujo - que describen un método de diseño para los sistemas de comunicación por fibra óptica así como un breve análisis en cada caso.

## 2 Proceso de Diseño para la Selección del Transmisor Optico

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo que muestra el - proceso de diseño en el subsistema transmisor. El diseño comienza con los requisitos propuestos por el usuario. Cualquier limitante de confiabilidad, de potencia o de medio ambiente que pudiera afectar la selección del componente y de esta manera la calidad - en la transmisión, debe tomarse en cuenta y permitir que influya - en la configuración del sistema y decisiones del tipo de componen - te.

La longitud de onda de transmisión y los requisitos de anchura - espectral son función de las características de la fibra óptica - elegida. Se ha supuesto que estos parámetros han sido ya inves - tigados y especificados como un resultado del esfuerzo del dise - ño del medio de transmisión.

La potencia óptica de salida acoplada se calcula a partir del ni - vel de señal mínima requerida en el extremo terminal del sistema y la pérdida de transmisión de la fibra óptica, incluyendo las - pérdidas por acoplamiento en la salida y empalmes. Esta figura - de potencia acoplada se obtiene después de las pérdidas por aco - plamiento en la entrada y de esta manera afecta la selección de - la fuente de acuerdo con sus características de emisión.

De manera general, podemos decir que un diodo LED se utiliza -- cuando se requieren productos ancho de banda- distancia bajos - y un diodo Laser cuando se necesitan valores altos de esta espe - cificación. Como puede notarse, el producto ancho de banda-dis - tancia (o velocidad de transmisión-distancia) relaciona la capa - cidad de transmisión de la fibra óptica con la distancia y tiene su origen en la limitante de dispersión.

Por ejemplo, para un sistema digital y basándose en la tecnología actual de longitud de onda de transmisión de  $0.85\mu\text{m}$ , un valor típico de producto velocidad de transmisión-distancia para un LED es de 140 Mbits-Km mientras que para un diodo Laser, este producto es de 2500 M bits/km debido principalmente a su reducido ancho-espectral.

Las características de acoplamiento para un diodo LED y un diodo-Laser son también muy distintas: Para un LED, las pérdidas por acoplamiento fuente-fibra son del orden de 16 dB, en cambio para diodo Laser solamente 3 dB. Sin embargo, el Laser, al ser un dispositivo cuyo funcionamiento está determinado por un umbral que depende de la temperatura, requiere de circuitos de control que lo hacen más costoso en comparación con el LED.

En el caso de modulación analógica, la salida de potencia óptica se especifica para lograr una determinada calidad de transmisión en términos de la Relación Señal a Ruido en el ancho de banda que va a utilizarse. Para sistemas de modulación digital, además de la potencia óptica, deben especificarse los tiempo de elevación y descenso de generación del pulso óptico en el diodo emisor, para conocer si es compatible el dispositivo con los requisitos de diseño. De no ser así puede reconsiderarse el formato de la señal digital ( Manchester, RZ, NRZ) y cambiar la selección de la fuente o considerar multicanalización en el espacio, es decir, un mayor número de fibras ópticas para transmitir la cantidad de información requerida, para reducir la velocidad del canal.

Finalmente, una vez que la fuente es compatible con los requisitos del usuario, el diseño se completa especificando las características de protección ambiental, alimentación y limitantes mecánicas.

### 3.3 Proceso de Diseño para la Selección del Cable de Fibra Óptica.

En la figura ( 3) se muestra un diagrama de flujo para la selección del cable de fibra óptica. Como puede observarse, el proce-

so comienza con un completo entendimiento de los requisitos básicos del usuario, incluyendo la distancia entre la fuente y el detector y el ancho de banda de la información. Basado en lo anterior, el diseñador supone la configuración de un cable de fibra óptica, que incluye:

- Número de fibras
- Apertura numérica
- Perfil de índice de refracción
- Longitud máxima disponible
- Atenuación en la longitud de onda de interés

El siguiente paso es entonces, calcular la pérdida total del enlace, incluyendo tanto pérdidas de atenuación en la fibra como pérdidas por acoplamiento.

Las pérdidas por acoplamiento están determinadas por las características de la fuente ( área y perfil de emisión) así como, las características de la fibra (apertura numérica, área e índice de refracción) y por reflexiones Fresnel.

Las pérdidas por acoplamiento de salida depende de: el índice de refracción de la fibra, el índice de refracción del medio entre la fibra y el detector, del campo de visión que ocupa el detector con respecto a la fibra óptica y de las reflexiones Fresnel.

Las pérdidas de transmisión pueden calcularse en base a la distancia conocida y a la atenuación de la longitud de onda óptica de interés. Sin embargo, en suma, debido a que las fibras disponibles se suministran generalmente en longitudes estándar menores a la distancia requerida, es necesario empalmar varios segmentos. Por lo tanto, la estimación de las pérdidas de transmisión deben incluir también, las pérdidas en los empalmes.

De la manera descrita en las discusiones procedentes, el diseñador continua ensayando, en los cálculos de la pérdida de transmisión y en la selección de la fibra hasta que se pueda encontrar -

un cable con una pérdida aceptable.

Suponiendo que un cable de fibra óptica satisface ya los requisitos de atenuación, se procede a determinar si las características de dispersión modal y del material son adecuadas para el ancho de banda requerido de la información. La dispersión del material se determina por el ancho espectral de la fuente, así como, por las propiedades del material de núcleo de la fibra. La dispersión -- modal se determina, básicamente, por la apertura numérica de la fibra de vidrio y el perfil del índice de refracción. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que el ancho de banda real de las fibras ópticas es mejor que el predicho por la teoría. De aquí, -- que para un diseño real, debe consultarse al fabricante para obtener datos más precisos.

Después que las propiedades de la atenuación y dispersión son satisfactorias, debe considerarse cuidadosamente el medio ambiente y los esfuerzos mecánicos de tensión bajo los cuales operará la fibra óptica para que de esta manera se especifique el diseño del cable que ofrezca protección y reforzamiento adecuados, ya que los esfuerzos de tensión y en particular aquellos que causan distorsiones en el eje de la fibra (curvaturas y microcurvaturas) -- pueden tener un efecto significativo sobre las propiedades de atenuación en la fibra.

Por último y tomando en cuenta las consideraciones anteriores se escribe el documento de especificación para el cable óptico.

#### 4 Proceso de Diseño para la Selección del Receptor Optico.

En la figura ( 4) se muestra un diagrama de flujo para el proceso de diseño en el subsistema receptor. Primeramente, el usuario define el tipo de información que va a manejarse, ya sea analógica o digital. En el caso analógico, el usuario debe especificar el ancho de banda de la información y la Relación Señal a Ruido que va a requerirse. En el caso digital, el usuario especifica la ve

locidad de transmisión y la tasa de error esperada en el sistema. Deben considerarse también, las condiciones ambientales que pueden afectar la elección del componente y de esta manera, la calidad en la transmisión del sistema.

Si el usuario requiere un sistema digital, debe considerarse el formato de la señal y el código de emisión para calcular el ancho de banda de la señal en el receptor. El formato de la señal se refiere a los diferentes esquemas de codificación tales como el Manchester, NRZ y RZ.

La sensibilidad del receptor es uno de los parámetros de diseño más importantes en el receptor óptico y como se mencionó, se refiere a la potencia óptica mínima requerida a la entrada del receptor para lograr una determinada Relación Señal a Ruido en sistemas analógicos y una determinada probabilidad de error en sistemas digitales.

Por ejemplo, la Relación Señal a Ruido en un receptor óptico analógico está en función de la intensidad de la señal eléctrica a la salida del receptor y de la intensidad de las señales de ruido las cuales se pueden dividir, básicamente, en dos componentes:

- Ruido térmico
- Ruido cuántico

Además, la intensidad de la señal eléctrica de salida depende de la potencia de la señal óptica incidente. De tal manera que, si conocemos las fuentes de ruido podemos entonces determinar la sensibilidad del receptor.

Es conveniente recordar algunas características básicas de los receptores ópticos. Primero, existen dos tipos de fotodetectores:

- Fotodiodo PIN ( Semiconductor P, Intrínseco y tipo N)
- Fotodiodo de avalancha APD (Avalanche Photo-Diode).

El fotodiodo PIN posee ganancia unitaria, es decir, por cada fotón se genera un electrón, en cambio, el fotodiodo de avalancha - puede generar hasta 100 electrones por cada fotón incidente. Sin embargo, esto último representa problemas de ruido por variaciones estadísticas sobre el nivel medio de su ganancia  $\langle m \rangle$ , la cual es una variable aleatoria.

Esencialmente, la selección del tipo de fotodiodo es un problema de optimización. Por otro lado, en el receptor óptico existe la alternativa de emplear amplificadores FET o bipolares que representan nuevamente un compromiso de uso, dependiendo de las fuentes de ruido que aparecen en estos dispositivos para diferentes rangos de frecuencia.

En receptores ópticos digitales la sensibilidad está también en función de las fuentes de ruido cuántico y térmico del receptor, pero además de lo que se conoce como Interferencia entre símbolos. Este efecto consiste en el translapamiento entre pulsos vecinos - de la señal óptica digital a lo largo de su recorrido en la fibra óptica.

Este fenómeno de interferencia entre símbolos es función de la señal óptica incidente y de la respuesta en frecuencia del receptor. Esto último sugiere que puede ser controlado parcialmente por el diseño adecuado de circuitos de filtro.

Cuando aumenta la distancia de transmisión en el sistema de comunicación óptico se requiere el uso de repetidores para regenerar la señal a intervalos determinados. Este proceso de regeneración se lleva a cabo en tres pasos, en el caso de un repetidor óptico digital:

- Amplificación e igualación de la forma de onda del pulso
- Recuperación de la señal de sincronismo del tren de pulsos
- Detección Síncrona y retransmisión de los pulsos.

Para un repetidor óptico analógico bastarían únicamente el primer paso y la retransmisión de los pulsos.

Es muy importante hacer notar que la separación máxima entre repetidores depende de la sensibilidad del receptor óptico que contienen, de manera que la metodología de diseño para un repetidor óptico es la misma que la de un receptor óptico y la de un transmisor óptico conjuntamente.

Cuando se ha logrado la señal mínima requerida se toman en cuenta, también, las condiciones ambientales, (temperatura, vibración, choque, radiación y humedad), consumo de potencia y acoplamiento mecánico, para escribir el documento de especificaciones del receptor.

## 5 Ejemplos de Diseño.

A continuación se presentan algunos ejemplos representativos de sistemas de comunicación por fibra óptica.

1. Supóngase que las pérdidas de transmisión permisibles en un enlace óptico son 50 dB, la atenuación de la fibra óptica es de 5 dB/km, el fabricante proporciona secciones de 1 km y las pérdidas promedio en cada empalme es 0.5 dB. ¿Cuál es la distancia máxima entre repetidores, cuándo no es significativa la limitante por dispersión?

solución:

$$\alpha L + kaj = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$\alpha = 5 \text{ dB/km}$$

$$L = ?$$

$$K = ?$$

$$a_j = 0.5 \text{ dB}$$

$$K = \text{número de empalmes} = \frac{L}{10}$$

$$f_{lim} = \frac{11 \times 1}{4 \times 2 \times 10^{-9} \times 50}$$

---


$$f_{lim} = 27.5 \text{ Mbd.}$$


---

Laser

datos:

$$\sigma_{tot} = 4 \text{ ns/km}$$

$$\alpha = 5 \text{ dB/km}$$

utilizando nuevamente (2.4):

$$f_{lim} = \frac{5 \times 1}{4 \times 4 \times 10^{-9} \times 50}$$

---


$$f_{lim} = 6.25 \text{ Mbd.}$$


---

2. Considerense los siguientes datos de un sistema de comunicación óptico, determine la distribución de potencia óptica ("presupuesto") en cada una de los componentes del enlace.

datos:

Velocidad de transmisión: 2.048 Mbit/seg

Código de Línea: 3B4B

Guía de onda: índice gradual,  $\alpha = 5.0 \text{ dB/km}$

Apertura numérica: 0.18

Logitud de fabricación:  $l_0 = 1.0 \text{ km}$

Fuente: LED,  $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ ,  $P_1 = 3.91 \text{ dBm}$ ;  $\sigma_{tot} = 4 \text{ ns/km}$

Sensitividad del receptor:  $-71.42 \text{ dBm}$

Solución:

Para determinar si el enlace está limitado por atenuación o por dispersión se utiliza la expresión 4.

$$\log \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = 50 \text{ dB.}$$

$$\alpha L + \frac{L}{10} a_j = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$L \alpha + \left( \frac{1}{10} \right) a_j = 10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$L = \frac{10 \log \left( \frac{P_t}{P_r} \right)}{\alpha + \frac{1}{10} a_j}$$

Sustituyendo valores:

$$L = \frac{10 \times 50}{5 + \frac{1}{1} \times 0.5} = 9.09$$

---


$$L = 9.09 \text{ Km}$$


---

3. Utilizando un diodo Laser como fuente de emisión (dispersión cromática o del material despreciable), una fibra de índice gradual con una dispersión total de  $\sigma_{tot} = 2 \text{ ns/km}$ ,  $\alpha = 11 \text{ dB/km}$  y un receptor para el cual  $10 \log \frac{P_t}{P_r} = 50 \text{ dB}$ , ¿Cuál es el límite de dispersión?. ¿ Para una fuente LED con  $\sigma_{tot} = 4 \text{ ns/km}$  y  $\alpha = 5 \text{ dB/km}$  cual es el límite de dispersión?

solución:

caso 1. Laser

datos:

$$\sigma_{tot} = 2 \text{ ns/km}$$

$$\alpha = 11 \text{ dB/km}$$

$$10 \log \frac{P_t}{P_r} = 50 \text{ dB}$$

$$f_{lim} = ?$$

Sustituyendo valores en la expresión ( 4) se tiene:

$$f_{lim} = \frac{\alpha}{4 \sigma_{tot}} \cdot \frac{1}{10 \log \frac{P_t}{P_r}}$$

$$f_{lim} = \frac{\alpha \cdot 1}{4 \sigma_{tot} \cdot 10 \log \frac{P_t}{P_r}}$$

Sustituyendo valores:

$$f_{lim} = \frac{5.0 \cdot 1}{4 \times 4 \times 10^{-9} \text{ ns/km} \times 3.91 - (-71.42)}$$

$$f_{lim} = 4.14 \text{ MBd.}$$

$$f_o = 2.048 \times \frac{4}{3}^* = 2.731 \text{ MBd.}$$

\* Este valor se debe a código de línea utilizado, el cual cambia-  
3 bits a 4 bits.

Como  $f_o < f_{lim}$ , entonces el sistema está limitado por atenuación.

La distribución de potencia se muestra en la tabla 1 y se han-  
supuesto además los siguientes datos:

Pérdida de acoplamiento fuente- fibra = 18.13 dB.

Pérdida por empalme = 0.3 dB.

Pérdida de acoplamiento fibra-detector = 0.5 dB.

Margen de tolerancia = 5 dB.

---

Tabla 1 Distribución de Potencia del enlace del ejemplo 3

---

Transmisor:

Diodo Emisor de Luz ( $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ )  $P_1 = 3.91 \text{ dBm}$

Pérdida por acoplamiento hacia  
la fibra  $K_1 = 18.13 \text{ dB}$

Nivel de entrada a la guía de onda

$$P'_1 = P_1 - K_1 = -14.22 \text{ dB}$$

Receptor:

Sensitividad del fotodiodo de avalancha  $P_2 = -71.42 \text{ dBm}$ .

Pérdida de acoplamiento de la guía onda  $K_2 = 0.5$  dB.

Nivel de salida de la guía de onda

$$P_2' = P_2 + K_2 = -70.92 \text{ dBm}$$

Pérdida en la transmisión :  $P_1' - P_2 = 56.70$  dBm

Pérdidas en la guía de onda

$$\alpha = 5.0 \text{ dB/km}, 9.8 \text{ Km} \quad L = 49.0 \text{ dB}$$

Pérdidas en los empalmes,

$$a_j = 0.3 \text{ dB (9 empalmes)} \quad a_j K = 2.7 \text{ dB}$$

$$\text{Margen de Tolerancia} \quad K_r = 5.0 \text{ dB}$$

$$\alpha L + a_j K + K_r = 56.7 \text{ dB}$$

Distancia entre repetidores  $L = 9.8$  Km

### Conclusiones.

En este capítulo, se ha analizado la metodología de diseño de los sistemas de comunicación por fibra óptica de manera general, tomando en cuenta los parámetros y limitantes principales.

Las conclusiones más importantes de este estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

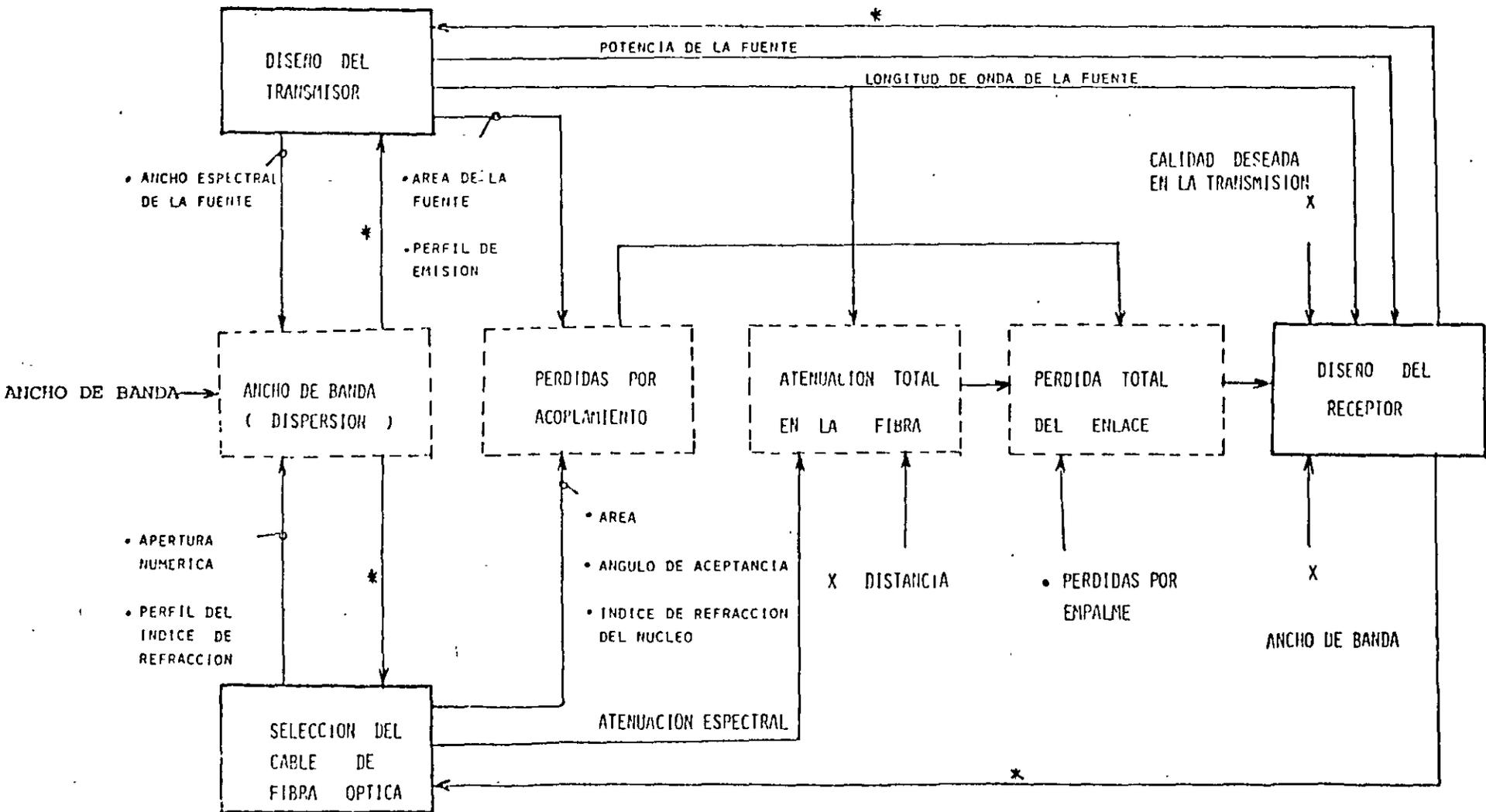
- Los parámetros de diseño de un sistema de comunicación por fibra se dividen, básicamente, en requisitos del usuario, cálculos principales y resultados de diseño.
- Los requisitos del usuario de interés son: la distancia, la velocidad de transmisión o ancho de banda, el tipo de datos: analógicos o digitales y la calidad en la transmisión (Relación Se

ñal a Ruido o probabilidad de error).

- Los cálculos principales están relacionados con las limitantes del sistema de comunicación por fibra óptica: atenuación y dispersión.
- Los resultados de diseño son las especificaciones para el transmisor, el cable, y el receptor ópticos.
- El proceso de diseño es un problema que involucra muchas variables y que puede llevar varios ensayos antes de completarse.

## REFERENCIAS

- 1.- Miller S.E. and A.G. Chynoweth. "Optical Fiber Telecommunications". First Edition. Academic Press. New York. 1979: 653:674.
- 2.- Information Gatekeepers, Inc. "Fiber Optics Design Aid Package". Vol. IV. Part 1. Fiber Optics Handbook and Manual Series: 2.1-2.28
- 3.- Kressel H. "Semiconductor Devices for Optical Communications". Topics in Applied Physics, Vol. 39. Springer-Verlag. Berlin. 1981: 89-160.
- 4.- Technical Staff of CSELT. "Optical Fibre Communications". First Edition. McGraw-Hill. New York. 1981:723-775.



X Requerimientos de diseño. [ ] Cálculo principal de diseño [ ] Salida de diseño

\* Decisión de diseño que modifica al elemento indicado

FIG ( 1 ).- ELEMENTOS PRINCIPALES EN EL PROCESO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA.

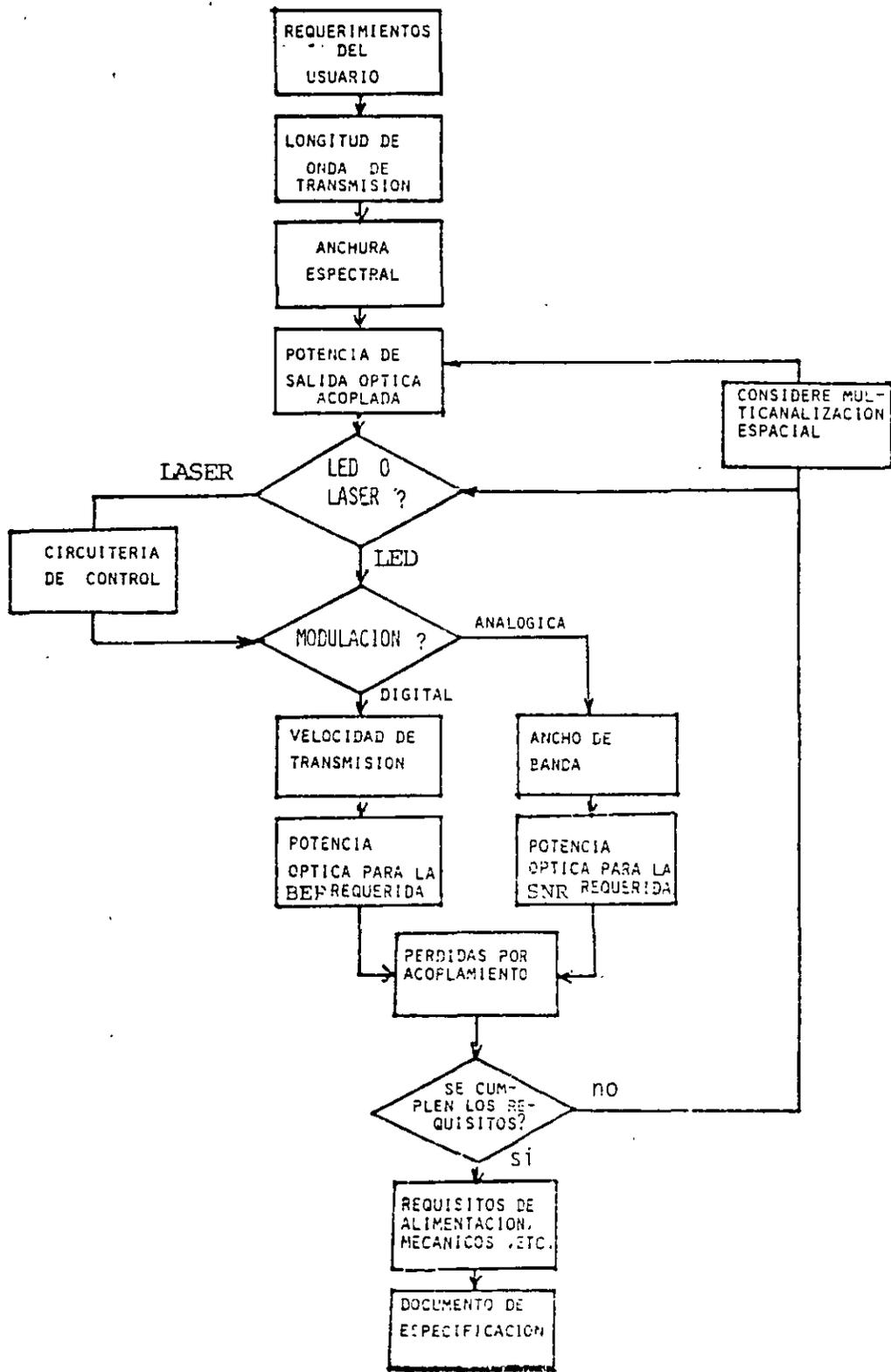


Figura ( 2).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del transmisor óptico.

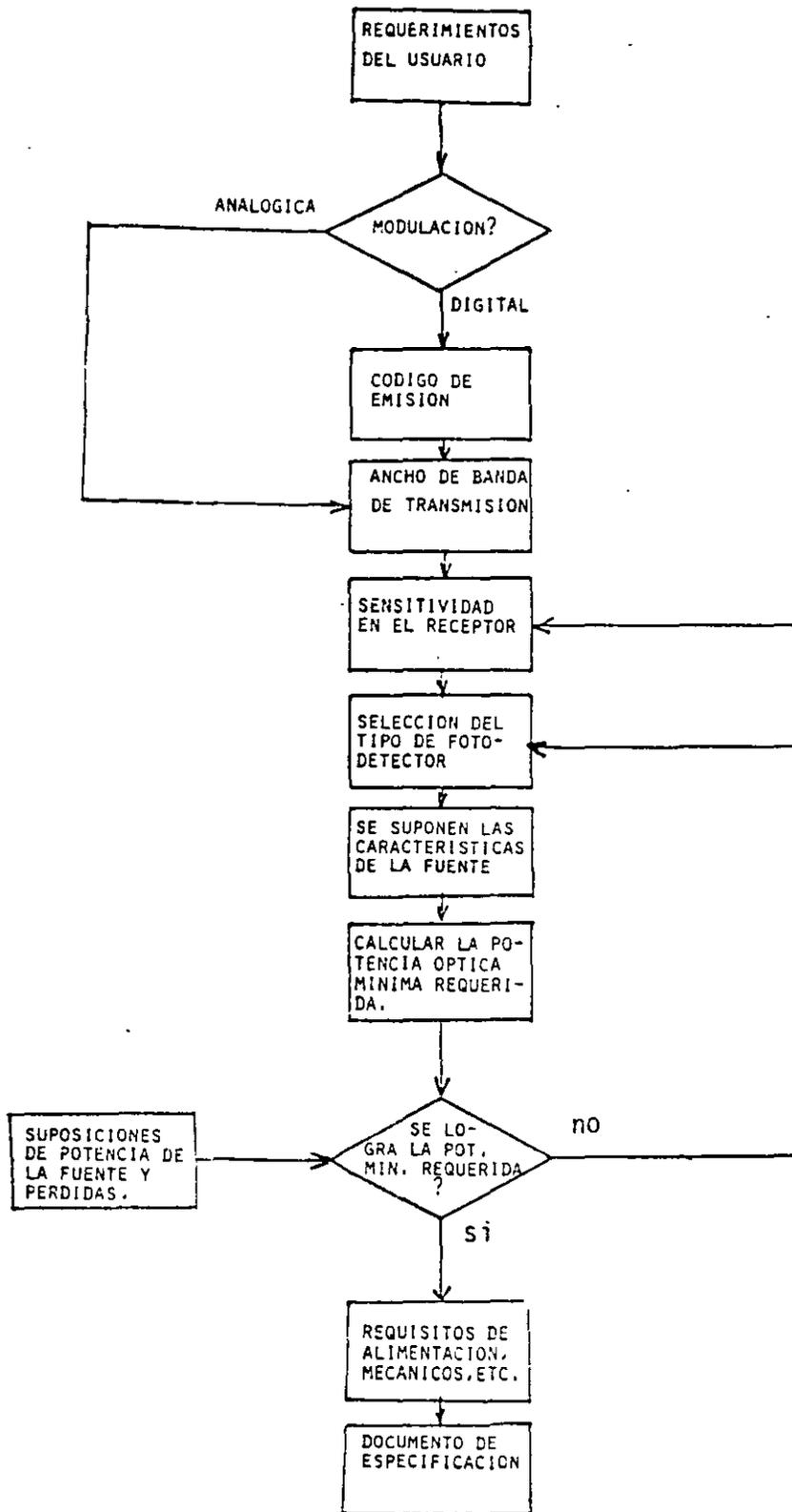


Figura ( 4).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del receptor óptico.

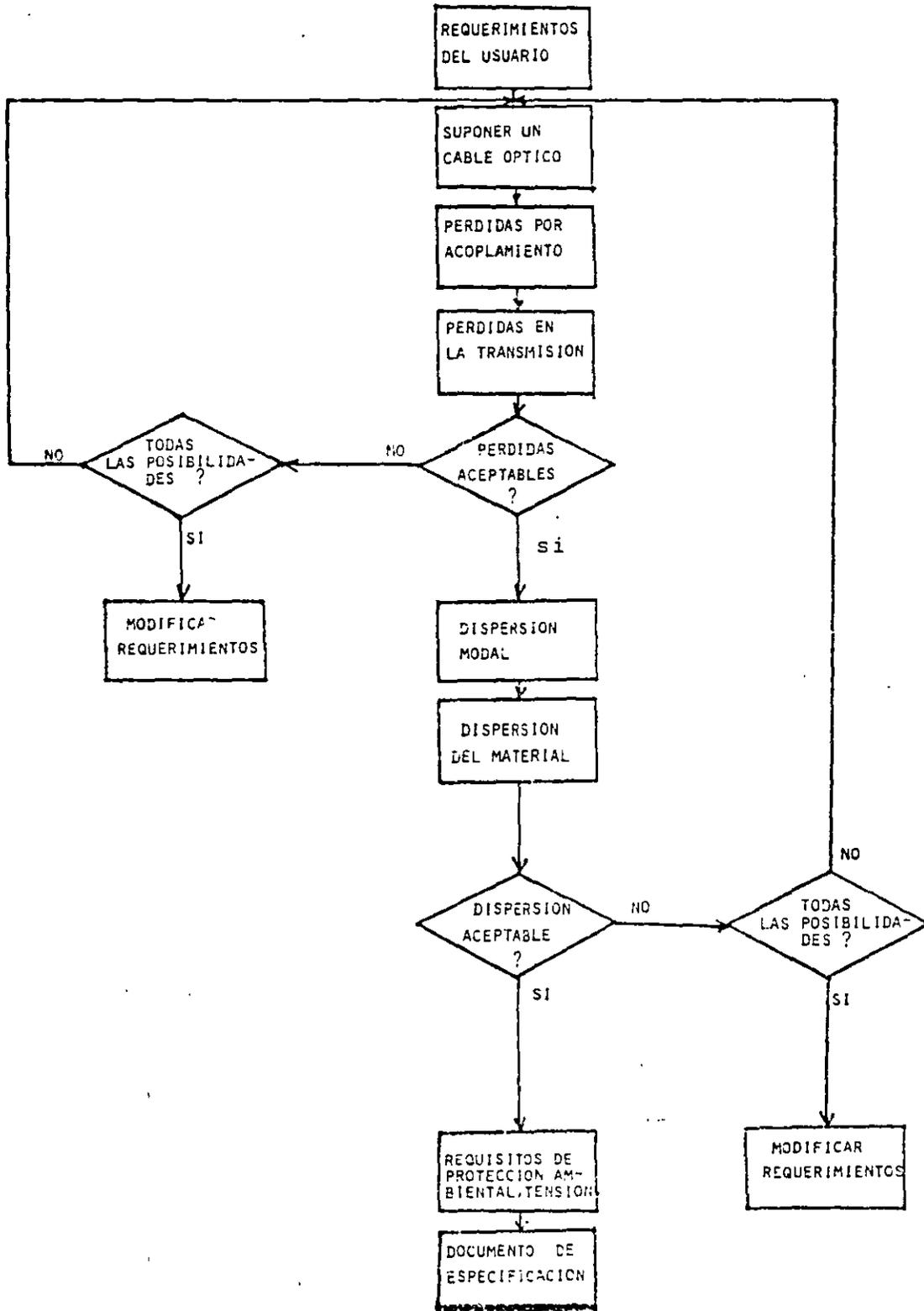


Figura ( 3).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del cable de fibra óptica.

## SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRAS OPTICAS

### INTRODUCCION

Los sistemas de comunicación por fibras ópticas han encontrado en los últimos años una gran aceptación en diversos sectores, debido principalmente a la gran versatilidad para el manejo de grandes volúmenes de información a altas velocidades. Las propiedades intrínsecas de la fibra óptica como son su inmunidad a la interferencia electromagnética, su aislamiento dieléctrico, su gran ancho de banda y su sección transversal y peso reducido le han permitido su aplicación en zonas expuestas a grandes interferencias como son las plantas nucleares y las plantas generadoras de electricidad.

Una de las aplicaciones más importantes de estos sistemas de comunicación es la telefonía. En ésta, los canales de voz son utilizados para la transmisión de señales eléctricas analógicas que contienen ya sea conversaciones, o señales de datos que han sido procesadas analógicamente.

Cabe mencionar que los sistemas de comunicación convencionales son el par telefónico, el cable coaxial y las microondas, entre otros, los cuales, en mayor o menor grado poseen problemas de congestionamiento de las líneas, en el caso de par telefónico, o bien, de limitación del espectro de frecuencia disponible, en el caso de las microondas. Es por ello que se ha acudido al empleo de los sistemas de comunicación por fibras ópticas los cuales presentan grandes ventajas para su empleo en corta y mediana distancia (menor a 30 Km), pero ciertas desventajas a larga distancia (mayor a 30 Km), con respecto a los sistemas de microondas.

Los sistemas de comunicación por fibras ópticas se clasifican en sistemas analógicos y sistemas digitales. En los sistemas analógicos se emplea principalmente la modulación en frecuencia, con una multicanalización en la frecuencia (FDM), mientras que en los sistemas digitales se utiliza principalmente la modulación por pulsos, con una multicanalización por división en el tiempo (TDM).

Los sistemas digitales requieren de mayor ancho de banda que los sistemas analógicos, para el mismo número de canales, debido a que una señal senoidal en general requiere de un muestreo de al menos dos veces por ciclo, con el objeto de asegurar una correcta representación digital, según el teorema de Nyquist.

Así los sistemas analógicos son principalmente aplicados a la transmisión de canales de televisión, mientras que los sistemas digitales permiten la transmisión de información, de códigos de protección, control y alarma de manera que se pueden satisfacer las diversas necesidades que se presenten.

En el presente capítulo se hace una descripción general sobre las características de los sistemas analógicos, y sus principales aplicaciones; lo mismo se hace con los sistemas digitales, en donde se describen los principales códigos utilizados, y los problemas de alimentación de repetidores para grandes distancias. En el siguiente punto se describen los diferentes bloques que componen un sistema de comunicación por fibras ópticas así como su importancia dentro del funcionamiento óptimo del sistema. Finalmente, se hace una comparación sobre las diferentes alternativas de comunicación existentes y las condiciones bajo las cuales los sistemas de fibra óptica presentan mayores ventajas.

Aunque la tecnología de fibras ópticas se ha encaminado para su aplicación en la transmisión de señales digitales, también tiene la posibilidad de utilizarse con señales analógicas. De hecho, puede pensarse que cualquier señal analógica es mejor digitalizarla a fin de evitar problemas de atenuación o distorsión de la señal bajo la presencia de ruido; sin embargo, desde el punto de vista económico resulta más atractiva la eliminación de los conversores analógico-digitales y digital-analógicos, además de poder disminuir los costos de multicanalización en el sistema. Este problema se observa en los sistemas de transmisión de televisión; una señal típica de video ocupa un ancho de banda de aproximadamente 5 mhz y existen codificadores que pueden convertir dicha señal en forma digital; estos codificadores muestrean la señal a una velocidad de 10 Mb/s, codificando las muestras mediante 9 Bits. Esto hace que el codificador llegue a requerir una capacidad de transmisión de 90 Mb/s por canal de video, lo cual lo hace económicamente prohibitivo. A pesar de la creación de otros codificadores que utilizan me-

nores tasas de transmisión, éstos más bien, son prácticos para enlaces de muy larga distancia. Es por ello que se ha acudido a los sistemas analógicos de fibras ópticas para la transmisión de la televisión por cable -- (CATV); desgraciadamente, la no linealidad de los componentes del sistema es una de las principales limitantes de este medio de comunicación. Como se observa en la figura 1 el sistema consiste básicamente en la recuperación de la señal eléctrica de salida proveniente de la cámara de televisión y su aplicación para modular directamente la intensidad de salida en un diodo emisor de luz (LED), o un diodo laser.

De esta forma, la señal óptica se propaga a través de la fibra, y es convertida de nuevo a su forma eléctrica en el receptor. Las no linealidades ya mencionadas producen problemas de armónicas y de intermodulación, los cuales pueden en un momento dado, llegar a distorsionar la imagen recibida, en el caso de que dicha intermodulación esté contenida en el ancho de banda de interés el cual es relativamente grande (aproximadamente 5MHz), la distorsión es bastante significativa. Una solución que evita este problema es la utilización de la modulación usando banda vestigial lateral, y una subportadora que permita la modulación de la intensidad de la fuente. Si la frecuencia de la subportadora es lo suficientemente alta, las armónicas y la intermodulación pueden alejarse bastante del ancho de banda de interés como para que un filtro elimine los posibles problemas de distorsión. En el caso de multicanalización se debe tener cuidado con el número de canales a transmitir, con el objeto de minimizar la aparición de armónicas y de intermodulación debido a un canal, en el espectro de otro canal transmitido. De hecho en la actualidad se manejan 8 canales por multicanalización en fibras ópticas, en comparación con los 50 canales que normalmente se transmiten en los sistemas de cable coaxial.

Se espera que cuando se resuelvan todos los problemas antes mencionados, la capacidad de canalización de los sistemas de fibras ópticas pueda igualar o rebasar la actual capacidad de los sistemas de cable coaxial.

Los sistemas analógicos se pueden clasificar de acuerdo a su capacidad de canalización en sistemas de baja capacidad y alta capacidad; un sistema - como el anteriormente descrito se conoce como un sistema óptico de baja - capacidad denominado FDM-IM.

Un sistema óptico de alta capacidad conocido como FDM-FM-IM es también utilizado en la transmisión de señales de video. En este sistema, la fuente luminosa es modulada en intensidad mediante una portadora de radio frecuencia. Así, las señales de video son usadas para modular la portadora de radio frecuencia, la cual puede estar en el rango de VHF (30 a 300 MHz). Estos sistemas de modulación en intensidad y de modulación en frecuencia pueden usar un laser en lugar de un diodo emisor de luz para aumentar la relación señal a ruido de transmisión.

A partir de esto, diversas portadoras de RF moduladas en frecuencia, localizadas a diferentes frecuencias pueden combinarse en una señal multicanalizada por división en la frecuencia. A su vez esta señal es utilizada para modular en intensidad la fuente luminosa. Este proceso FDM-FM-IM permite la transmisión de varios canales de video por una sola fibra, como se observa en la figura 2.

La idea de utilizar la conmutación como un medio para transmitir información se remonta a épocas pasadas; el uso de la clave morse es una versión particular a este respecto. Es aquí donde las fibras ópticas tienen su campo de acción más promisorio, ya que bajo esta tecnología no solo se pueden manejar aspectos como la telegrafía, telefonía o transmisión de datos entre computadoras, sino también imágenes fijas o en movimiento. El sistema se basa prácticamente en el muestreo de la señal analógica, la cual se codifica digitalmente, para así ser transmitida a través de la fibra óptica.

La codificación permite el manejo de grandes flujos de unos o ceros sin tener una distorsión significativa, lo cual establece en gran medida una disminución de la probabilidad de error de la transmisión. Sin embargo, este sistema puede acarrear problemas para enlaces de fibra óptica, en los cuales se tengan altas velocidades, ya que como los pulsos de luz son unipolares

res (hay o no hay "luz"), el receptor debe estar acoplado en corriente alterna (AC), a fin de eliminar los errores por la presencia de corriente directa (DC) indeseable.

Antes de pasar a la descripción de un sistema digital, es conveniente hacer notar la incompatibilidad de los sistemas digitales manejados por Estados Unidos con respecto a Europa; tanto unos como otros manejan ciertos niveles de jerarquía de acuerdo a sus propias necesidades; así, los norteamericanos se basan en un sistema que convierte una señal telefónica de 4 KHz en forma digital y además multicanalizada a través de un banco de canales. Dicho banco de canales convierte 24 canales de voz en su versión digitalizada, y los combina de tal manera que es generado un flujo binario de datos a una frecuencia de 1.544 MHz. Por lo tanto, cada canal de voz ocupa 64 Kb/s del total requerido. Dicha tasa de transmisión es por lo tanto de 1.544 Mb/s, y pertenece a la jerarquía DS1 (digital signal 1). Para obtener una tasa de transmisión más alta, lo que generalmente se acostumbra es realizar una multicanalización conjunta para producir una señal compuesta de mayor velocidad; de esta forma, velocidades de aproximadamente 10Mb/s (que incluye bits para control de mantenimiento), se generan por medio de señales tipo 6 DS1. Análogamente, los Europeos fundamentan su sistema en que cada señal de voz (se considera que posee un ancho de banda de 4 KHz aproximadamente) se muestra a una frecuencia de 8000Hz, según lo señalado por el teorema de Nyquist y cada muestra es convertida a una palabra digital (BYTE) de 8 bits. Dentro de esta codificación el primer bit da la polaridad de la señal, mientras -- que los otros 7 se utilizan para definir la magnitud de la misma, de acuerdo con características de la ley de cuantificación logarítmica. Por convención, se ha optado por usar los primeros 3 bits, después del bit de polaridad, como la característica, y los últimos 4 como la mantisa. Basados en este procedimiento, cada canal de voz requiere de una tasa de transmisión de 64 Kb/s, pero por economía, la multicanalización en el tiempo se realiza -- con 30 canales, generando un flujo de transmisión de 2.048 Mb/s.

Así las muestras de cada canal son intercaladas en el tiempo, de manera que cada trama se constituye de 32 intervalos de tiempo; parte de estos intervalos son utilizados como elementos de sincronización, además de contar con algunos bits de servicio requeridos para la sincronización de la trama, y -

alarma, por solo mencionar algunos ejemplos. Esta es la razón por la cual las tasas de transmisión resultantes no son exactamente el cuádruple de la inmediata inferior considerada. En la tabla I se muestran las diversas jerarquías utilizadas tanto en Europa como en Estados Unidos de acuerdo a la tasa de transmisión requerida.

## CARACTERISTICAS DE TRANSMISION

Un sistema de transmisión digital requiere de llevar flujos datos de un -- punto a otro con la cantidad mínima de error.

Para lograr lo anterior, uno de los factores que deben tomarse en cuenta, es el formato de los datos. Por ejemplo, la transmisión de largas cadenas de "ceros" y "unos" pueden hacer perder la sincronía en la recepción de la señal, siendo una posible solución el uso de un código de retorno a cero -- (RZ). Este código se caracteriza porque presenta un mayor número de transiciones entre estados alto-bajo y requiere el doble del ancho de banda comparado con un código de no retorno a cero (NRZ).

El código de retorno a cero es particularmente conveniente en el caso de -- transmisión síncrona (transmisión de datos junto con la señal de reloj) ya que se puede extraer la señal de reloj de manera directa; en cambio para los de no retorno a cero se debe enviar la señal de reloj por otra fibra, lo que hace que el costo de transmisión incremente considerablemente.

Por esta razón muchos fabricantes sugieren códigos como el Manchester, o -- el de tipo bipolar; dichos esquemas permiten un mejoramiento en la calidad de la información.

Ambas codificaciones permiten un equilibrio en la densidad de pulsos y espacios; el aleatorizador, además de esto, genera un patrón aleatorio reversible para la codificación de la señal. Por su parte, la codificación HDB-3 -- (high density bipolar), también utilizado en los sistemas de conductores metallicos, permite el mantenimiento de un bajo nivel de corriente directa en la línea, a manera de protección contra una disipación inútil de potencia -- de la señal. Una versión del código HDB-3 es el código AMI, (Alternative --

Mark Inversión) el cual se utiliza en el caso de enlaces limitados por dispersión, afin de no aumentar la velocidad de transmisión.

## TIPO DE REDES Y REPETIDORES

En los sistemas digitales de comunicación por fibras ópticas existen varios problemas que se deben solucionar; el problema de la codificación de la señal, que ya ha sido mencionado, el problema de la derivación en una red de comunicaciones y el problema de la instalación y alimentación de los repetidores para sistemas de largo alcance.

En este punto se estudiarán estos dos últimos problemas.

Hay dos tipos básicos de redes de comunicaciones: la de "Árbol" y la de "Anillo".

En la figura 3 se muestra una red de "Árbol", la cual se basa en una terminal principal y varias terminales remotas.

La figura 4 ilustra una red de "Anillo". Dichas redes de datos están limitadas por la considerable cantidad de Bits de control requeridos para mantener una comunicación ordenada entre las diversas terminales.

Unos de los principales puntos a desarrollar en las redes digitales de fibras ópticas es el referente a la derivación terminal. Hay básicamente dos formas para conectar terminal a la red; en el caso de un acceso por "derivación regenerativa", como se indica en la figura 5 la señal óptica finaliza en la terminal, y a partir de ahí se genera una nueva señal óptica. La información digital puede ser modificada en dicha terminal mediante la adición o supresión de algunos Bits.

Sin embargo, este acceso tiene la desventaja de que si en un momento dado se presenta una falla en alguna terminal se puede alterar el funcionamiento de la mayor parte de la red.

En el acceso por "derivación óptica", señalado en la figura 6 un acoplador óptico es usado para remover la luz de la fibra, o por el contrario, agregar luz a la misma. De esta forma, si la terminal llega a fallar, sólo la sección perteneciente a dicha terminal se verá afectada en la comunicación.

Las desventajas de este método son la necesidad de la derivación óptica -- misma y la dificultad para supresión o modificación de los pulsos de la red óptica. Otro aspecto importante a considerar es el aprovisionamiento de potencia óptica de la red, ya que la señal óptica no es regenerada en cada no do terminal y por lo tanto, presenta diferentes pérdidas tanto por la deri vación, como entre las derivaciones de la red, lo cual limita considerablemente el tamaño de la misma.

Pasando el problema de los repetidores, cabe mencionar que las complicacione s más importantes se presentan en sistemas de largo alcance, ya que en los de corto alcance se puede establecer un cierto control y mantenimiento de los mismos. Debido a la necesidad de maximizar la distancia entre los repetidores, se ha acudido al uso de fuentes de laser a fin de obtener alta potencia de entrada y baja dispersión cromática; también se pueden utilizar - fibras ópticas de bajas pérdidas y grandes anchos de banda, fibras ópticas de índice gradual, o en su caso, fibras monomodales.

Se ha concluído que con el objeto de minimizar las pérdidas de la fibra óptica se requerirá del uso de la tecnología de longitud de onda de 1.3um. - donde la atenuación y dispersión son muy reducidas. Esto permitirá enlaces mayores de 50 Km sin uso de repetidores.

En lo que respecta a la alimentación de los repetidores, existen diversas - alternativas: se pueden utilizar conductores metálicos, dispuestos ya sea - en el propio cable de fibra óptica, o en un cable independiente; se ha pensado también en una alimentación local por medio de baterías y celdas solares, lo cual representa ciertos costos de mantenimiento y de instalación, - además de que el hecho de que estén expuestos al medio ambiente reduce el - tiempo de vida útil de los mismos.

Finalmente es importante señalar algunas de las razones por las cuales el costo de instalación y mantenimiento de enlaces a larga distancia y con altas tasas de transmisión ha disminuido considerablemente.

En primer lugar, las fibras ópticas de baja dispersión trabajan bastante bien bajo todas las tasas de transmisión, siempre y cuando la fuente y la longitud de onda emitida sean adecuadas.

En segundo lugar, la distancia entre repetidores, en la longitud de  $1.3\mu\text{m}$ , no depende fuertemente de la tasa de transmisión, ya que dichos enlaces están limitados por atenuación más que por dispersión.

Es por ello que el desarrollo de mejores sistemas digitales de comunicación por fibras ópticas, dependerá en gran medida de que se superen todas las anteriores limitantes mencionadas, principalmente en lo que a alimentación y monitoreo de repetidores se refiere.

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En esta sección se hace una descripción del funcionamiento general de un -- sistema de comunicación por fibras ópticas con el objeto de dar una visión más clara de los elementos que constituyen el sistema y sus principales características de operación.

El diagrama a bloques de un sistema de comunicación por fibras ópticas se muestra en la figura 7 en dicha figura se indican los dos tipos de siste-- mas de comunicación: los sistemas digitales (a) y los sistemas analógicos (b). El primer bloque de la figura 7 se refiere a la multicanalización de las señales recibidas a fin de ser transmitidas por un solo canal. Existen dos métodos que se pueden emplear: multicanalización por división en la -- frecuencia y la multicanalización por división en el tiempo. Ambos métodos permiten definir el tipo de modulador a utilizar dentro del sistema.

Si se emplea la multicanalización por división de la frecuencia, implica la utilización de amplitud modulada en la fuente luminosa para producir una variación en la intensidad de luz. El uso de la multicanalización por división en el tiempo, significa la comutación directa del estado de la fuente luminosa (encendida o apagada), a una cierta velocidad.

Una de las principales limitantes de la modulación directa es la velocidad, que algunas responden muy lentamente a las variaciones de su potencia -- eléctrica. Sin embargo, fuentes luminosas como el laser de inyección o simplemente el LED, pueden ser manejadas a velocidades de transmisión razonable.

Se puede concluir que la multicanalización por división en la frecuencia -- se aplica para la transmisión de señales analógicas, mientras que la canalización por división en el tiempo se utiliza en la transmisión de señales digitales.

En el siguiente bloque de la figura 7 se describen el tipo de codificador de línea a utilizar en el caso de un sistema digital de comunicación.

Como ya se mencionó, existen varios tipos de codificaciones; entre ellas -- destacan la codificación bipolar, la Manchester, el aleatorizador y el HDB-3.

La codificación binaria, como se ilustra en la figura 8 convierte cada pulso de entrada alternativamente en un pulso positivo o negativo. Así la señal binaria es transformada en una señal ternaria. Esta operación es fácilmente recuperable en el decodificador, ya que los pulsos positivos y negativos en la señal ternaria representan pulsos positivos para una señal binaria. El efecto de la codificación bipolar es el equilibrar la señal con respecto a un nivel de corriente directa. Desafortunadamente esta señal ternaria es ineficiente, ya que transmite 1.58 Bits de información por símbolo, comparativamente con la señal binaria que transmite únicamente 1 Bit de información -- por símbolo.

Otro tipo de codificación es la Manchester, también conocida como bifase o de fase dividida; ésta requiere del doble de ancho de banda, por ser del tipo retorno a cero (RZ), lo que reduce su capacidad de transmisión con respecto a las de no retorno a cero (NRZ).

La descripción de esta codificación se puede observar en la figura 9.

Este tipo de codificación provoca un aumento de la tasa de símbolos al doble, debido a que el código se reduce a la mitad del ancho del intervalo de tiempo de la señal proveniente de la fuente luminosa. Por otro lado, si la señal codificada en Manchester se encuentra acoplada en AC, sólo se obtendrá un nivel de corriente directa, cuyo valor es 1/2 de la señal de salida; ésta se debe al equilibrio existente en la densidad de los pulsos y espacios relativos al código.

El aleatorizador es un dispositivo que establece de cierta manera una codificación al mensaje transmitido; se caracteriza por ser un limitador del posible desequilibrio en el número de pulsos o espacios; así, el aleatorizador pretende una transformación aleatoria del patrón de la señal de entrada mediante una operación de codificación reversible. Dicho código permite una recuperación bastante fiel de la señal transmitida, ya que el desaleatorizador regenera el patrón aleatorio utilizado originalmente.

5B6B codificador, DSCR aleatorizador, FO localización de fallas, LA alarma laser. OS transmisor laser. REG regenerador, SCR desaleatorizador.

Finalmente la codificación HDB-3, se utiliza principalmente como complemento de los sistemas PCM, ya que al igual que los anteriores, la aparición de una señal con una larga secuencia de unos a ceros provoca la pérdida de sincronía en el receptor óptico.

El código se establece de la siguiente manera:

Todos los unos lógicos son alternativamente transmitidos como niveles positivos y negativos, mientras que los ceros se transmiten como ceros. Aunando a lo anterior, si más de 3 ceros consecutivos ocurren, el cuarto cero se --

codifica como un uno de la misma polaridad que el uno anterior. Dichos -- unos son conocidos como "violaciones" de la regla general y son interpretados como ceros por el receptor óptico.

En la figura 10 se observa un sistema PCM típico basado en fibras ópticas y en la codificación HDB-3.

Una versión del código HDB-3 es el código AMI, el cual se diferencia del -- primero en que los BITS de "Violación" no son utilizados; por lo tanto, -- una secuencia larga de unos o ceros puede llegar a ocurrir en la recepción. Para el caso de sistemas limitados por dispersión, se requiere que las codicaciones no aumenten la tasa de transmisión utilizada, para lo cual se emplean codificaciones como la de la fig. 11. que permiten una interfaz del código HDB-3 para su transmisión óptica a través de la fibra. Como se puede observar en la fig. 11, lo único que se necesita es mantener un nivel de potencia óptica  $P_t$  para la transmisión, y que éste sea modulado por las señales de codificación HDB-3. Este tipo de codificaciones presenta el problema de un nivel de estabilización tanto para el transmisor como para el receptor.

En lugar de esta codificación de interfaz han presentado diferentes opciones como son el código de interfaz 1B2B, en el que un Bit se representa -- por dos Bits.

Ejemplos de este tipo de códigos es el AMI de segundo nivel y el CMI (Complemented, Mark Inversion). Sus características son las siguientes: para -- el caso del código AMI de segundo nivel, si aparece un pulso positivo, la codificación óptica es "11", para un pulso negativo si codifica como "00", y en el caso del cero se codifica "10" si aparece después de un pulso negativo y es "01" si el cero aparece después de un pulso positivo.

Como se puede ver este tipo de códigos de interfaz no manejan largas cadenas de "0" ó "1" lo que impide una sobrecarga en la fuente luminosa.

Las codificaciones prohibidas como son "01" después de pulso negativo o -- "10" después de pulso positivo en el código AMI, y "01" en el CMI, permiten la detección de errores.

Su principal desventaja es el aumento al doble de la tasa de modulación lo cual no es recomendable en sistemas limitados por dispersión, por lo que su aplicación se encamina para sistemas con limitaciones por atenuación.

Es por ello que se ha buscado aplicar otro tipo de codificaciones como la 2B3B, etc. que permitan que las tasas de transmisión no aumenten demasiado.

Después de codificada la señal, ésta pasa por una etapa de amplificación - para que su nivel de entrada al transmisor óptico sea el adecuado; dicho transmisor puede estar constituido por dos tipos de fuentes luminosas: el diodo emisor de luz (LED) y el laser.

La emisión de LED es de tipo lambertiana, lo que significa que los rayos de luz son emanados sobre un hemisferio completo; otra forma con la que se describe el tipo de emisión de luz por un LED es la palabra "ISOTROPICO", lo que implica que los rayos de luz son emitidos en todos los ángulos. Esto -- provoca una cierta ineficiencia en el acoplamiento de un LED a la fibra óptica. Como se sabe, la respuesta de un led es directamente proporcional a la corriente que pasa a través de la unión, de tal forma que el cambio en la potencia óptica de salida fundamentalmente lineal para un cierto rango de corriente de entrada, por lo que se manifiesta como un dispositivo ideal para el uso de un sistema de amplitud modulada.

Dependiente de sus características, un LED puede conmutar a velocidades -- arriba de 200 millones por segundo, aunque de hecho la tasa máxima de transmisión que se trabaja actualmente es de 50Mb/s.

El laser es un dispositivo de umbral: una vez encendido, provee una larga cantidad de potencia óptica; esto se logra cuando la corriente manejada alcanza el valor de umbral, como se observa en la figura 12.

Dicha gráfica nos muestra cómo el rango lineal que maneja el Laser es muy limitado, por lo que es un dispositivo adecuado para la amplitud modulada.

Sin embargo, el ancho espectral del Laser es mucho más angosto que el del led, por lo que los problemas de dispersión se disminuyen significativamente; además el Laser puede transmitir a mayor velocidad que un Led convencional.

Es por ello que se recomienda el uso del Laser para sistemas de muy alta velocidad (Gb/s), y que usen la modulación por pulsos, dentro de los que destaca el PCM.

Las propiedades básicas de un laser son la coherencia y la colimación.

La coherencia implica que los rayos se encuentren en fase con otros, por lo que se refuerzan entre ellos; la luz proveniente de una fuente totalmente coherente posee una sola longitud de onda.

La colimación se refiere a que todos los rayos viajan en caminos paralelos. Ambas propiedades son ideales para su uso en las comunicaciones por fibras ópticas.

El Led se aplica principalmente en sistemas limitados en ancho de banda, y de corto alcance, mientras que los Lasers se emplean en enlaces de largo alcance.

Una vez descritos los tipos de fuentes luminosas, se debe considerar la etapa propiamente de transmisión de la señal óptica a través de la fibra misma; por lo general el acoplamiento entre el transmisor y la fibra óptica se realiza lo suficientemente cerca como para que el área de emisión de la fuente sea comparable con la sección transversal de la fibra; esto disminuye los problemas de pérdidas de potencia óptica y por lo tanto, costos innecesarios de alimentación al sistema.

Cabe mencionar aquí, algunas de las características generales de la fibra óptica.

Su mecanismo de propagación es la reflexión total interna; se encuentra constituida por un núcleo y un revestimiento. El índice de refracción del revestimiento (vidrio o plástico), es ligeramente menor que el índice de refracción del núcleo; sus dimensiones típicas son entre 50-100  $\mu\text{m}$  de diámetro para el núcleo y de 100-200  $\mu\text{m}$  de diámetro para el revestimiento. Fibras con pérdidas menores a 10dB/km permiten una transmisión eficiente para varios kilómetros sin repetidor; en sí, la tecnología de cables con una pérdida menor a 4dB/km y con longitud de onda de 0.8  $\mu\text{m}$  se encuentra comercialmente disponible.

En la etapa de recepción del sistema de comunicaciones por fibra óptica, el primer paso es la recuperación de la información óptica transmitida, para que posteriormente pase a ser decodificada. Para ello es necesario la conversión de la señal óptica incidente a su correspondiente señal eléctrica. El dispositivo a utilizar se conoce como Fotodetector. Dos tipos de fotodiodos son los más usados para este propósito; uno de ellos consiste en una unión PN con una capa intrínseca entre las regiones P y N. Este se conoce como diodo PIN. El otro diodo se conoce como fotodiodo de avalancha (APD). En cada uno de estos diodos, el hecho de que sean iluminados por la fibra en la región cercana a la unión, provoca un aumento del nivel de energía de los electrones en la unión. En efecto, la resistencia de la unión disminuye, lo que permite un flujo mayor de corriente a través de la unión, y consecuentemente a lo largo del circuito.

El fotodiodo avalancha es más eficiente que el tipo PIN. Debido a que niveles más altos de energía en la unión representan un mayor flujo de corriente, el efecto de avalancha genera una ganancia en la potencia de la señal a través del diodo; por ello, los fotodiodos avalancha poseen mejor sensibilidad que los diodos PIN.

La sensibilidad se define como la mínima entrada de luz requerida para un nivel de funcionamiento dado. Este nivel de funcionamiento se establece a partir de la relación señal a ruido para los sistemas analógicos de comunicación, o con respecto a la tasa de error por BIT en los sistemas digitales de comunicación.

El APD es más conveniente que el PIN en los sistemas que requieren grandes anchos de banda. Sin embargo, los APD tienen la desventaja de necesitar altos voltajes de polarización, y una gran sensibilidad a la temperatura. Esto obliga al empleo de fuentes de alimentación con voltajes del orden de 100 a 400 volts.

Posteriormente, las señales eléctricas provenientes del fotodetector son conectadas a la entrada de un amplificador. Las señales en este punto pueden ser analógicas o digitales, dependiendo del sistema utilizado.

Este amplificador debe ser de bajo ruido, de banda ancha y que no cargue resistivamente al fotodiodo.

La salida del amplificador es una réplica de las señales de banda base utilizadas en la etapa de modulación del sistema de comunicación. Estas señales pasan por el decodificador correspondiente, para finalmente pasar al demulticanalizador, ya sea por división en el tiempo o en la frecuencia, y se reintegren las diversas señales a sus canales correspondientes.

### ANALISIS COMPARATIVO CON OTROS SISTEMAS DE COMUNICACION

En primer lugar se realizará una descripción de las ventajas de la tecnología de fibras ópticas con respecto a otros sistemas de comunicación, para después evaluarla con respecto al rango de distancia en que los sistemas de comunicación por fibras ópticas se apliquen.

El cable de fibra óptica presenta varias ventajas en comparación con el cable metálico. Una de ellas es la inmunidad de la fibra óptica a la interferencia electromagnética. El tipo de material que la constituye es dieléctrico, de forma que la inducción electromagnética en el medio no influye en la transmisión de información. Por su parte, las señales ópticas en el cable no causan radiación electromagnética. Esto hace que no se afecte la comunicación de otros usuarios.

El cable de fibra óptica multipar es mucho menor en diámetro que un cable de cobre multipar para la misma capacidad de transmisión. Esto es una ventaja muy importante, sobre todo cuando se hacen instalaciones en ductos saturados; además, el cable óptico posee una mayor flexibilidad que uno de cobre, lo que facilita la instalación.

Por su resistencia a altas temperaturas y a la corrosión, se puede instalar en medios que normalmente el cable metálico no resistiría.

En lo que respecta al uso de repetidores el uso de cable óptico de alta calidad tiene menor atenuación que el par telefónico o el cable coaxial, por lo que un sistema de fibras ópticas requiere menos repetidores que un sistema convencional de cobre. Sin embargo, esta ventaja se reduce por el hecho de que el repetidor de un sistema de comunicación por fibras ópticas es más complejo que el repetidor empleado en los sistemas de conductores metálicos. Los costos de instalación de un repetidor son bastante favorables comparativamente con los costos en un sistema de cable coaxial, pero no tan favorable si hablamos de sistemas de microondas.

Generalmente, el mayor uso que se le ha dado a los sistemas de comunicación por fibras ópticas es el de troncales digitales entre centrales telefónicas. Una gran parte de las necesidades futuras de comunicaciones telefónicas será cubierta por esta tecnología en lugar de los sistemas convencionales de par telefónico, cable coaxial y microondas.

Por otra parte, las fibras ópticas poseen un mayor ancho de banda que el cable metálico, lo que permite el manejo de un mayor volumen de información.

En lo que se refiere al uso de cable coaxial para la transmisión de canales de televisión, este resulta todavía muy atractivo comparado con los sistemas de fibra óptica, principalmente debido al reducido número de canales que actualmente esta tecnología puede manejar, ya que aún se tienen problemas con la no linealidad de los componentes optoeléctricos.

En la tabla II se muestra una comparación de las características del cable coaxial con las de un cable de fibra óptica.

De manera general se puede hablar de las ventajas que presenta un sistema de comunicación por fibras ópticas acuerdo a las diferentes distancias bajo las cuales se esté aplicando. Para enlaces a muy corta distancia (menor a 100m), la justificación del uso de fibras ópticas debe ser muy especial, ya que cualquier otra alternativa de comunicación puede suplir su aplicación, reduciendo los costos de inversión (alta interferencia electromagnética, ruido, transitorios eléctricos, etc.).

A corta distancia (mayor a 100m y menor a 1Km), la fibra difícilmente compete económicamente con los sistemas convencionales, excepto a muy altas frecuencias y bajo condiciones especiales como las ya indicadas.

A media distancia (mayor 1Km y menor 30Km), la combinación capacidad-distancia, favorece en costo a la fibra óptica con respecto al cable coaxial y al cable de cobre multipar, indudablemente su ventaja en cuanto a flexibilidad, resistencia a altas temperaturas y a la corrosión permiten su aplicación en la comunicación de centrales telefónicas interurbanas, contenidas por lo general en este rango de distancia.

Para larga distancia (mayor a 30Km), el incremento del uso de repetidores hace que la tecnología actualmente desarrollada (fibras ópticas multimodales a una longitud de onda de 0.85 $\mu$ m) no sea lo suficientemente competitiva con los enlaces de microondas actualmente empleados. Quizá el desarrollo de la tecnología de longitud de onda de 1.3 $\mu$ m, con su consecuente disminución de repetidores, permita que los sistemas de comunicación por fibras ópticas resulten más atractivos económicamente a largas distancias.

De lo anterior se puede concluir que en la actualidad los sistemas de comunicación por fibras ópticas tienen una mejor competitividad con otros medios de comunicación en media distancia.

Potencia acoplada .....0 dBm.

Mínima pot. en recepción .....-50 dBm.

Pérdida en línea ..... 50 dB.

Pérdidas fijas:

Conectores ..... 1 dB

Margen para equipo ..... 3 dB

Total ..... 4 dB

Pérdidas en instalación ..... 46 dB

Pérdidas variables (en instalación):

Cable ..... 0.5 dBs/Km.

Empalmes (0.1 dB.c/u 1/2Km.) 0.2 dBs/Km.

Margen ..... 0.1 dBs/Km.

Total ..... 0.8 dBs/Km.

$$\text{Dist.} = \frac{\text{perdidas en inst.}}{\text{perdidas variables}} = 57 \text{ Km.}$$

## TABLA 1

	ESTADOS UNIDOS					EUROPA					
NIVEL DE JERARQUIA	T-0	T-1	T-2	T-3	T-4	0	1	2	3	4	5
TASA DE TRANSMISION (Mb/s)	0.064	1.544	6.312	44.736	274.176	0.64	2.048	8.448	34.368	139.264	565.148
NUMERO DE CANALES	1	24	96	672	4032	1	30	120	480	1920	7680

TABLA 2.

	CABLE DE 144 FIBRAS OPTICAS A 45 Mb/s	CABLE COAXIAL DE 22 ELEMENTOS A 274 Mb/s	UNIDADES
CAPACIDAD	45,000	40,000	CANALES DE VOZ
DIAMETRO	0.5	3.0	PULGADAS
SECCION TRANSVERSAL	0.2	7.0	PULGADAS CUADRADAS
PESO	0.1	10	LIBRA/PIE
COSTO (MATERIALES)	COMPARABLE		
ESPACIAMIENTO REP.	4	1	MILLAS

TABLA 3

APLICACION	DIAMETRO	PERDIDA POR KM.	FRECUENCIA (MHz)	COSTO POR Km (Dis)	
				(a)	(b)
GRAN TRONCAL					
CABLE COAXIAL	1	23 dB	300	1600	1600
FIBRA OPTICA	1/2	4	300	1000	800
TRONCAL					
CABLE COAXIAL	1/2	42	300	415	415
FIBRA OPTICA	3/8	4	300	600	400
DISTRIBUCION					
CABLE COAXIAL	3/8	55	300	305	305
FIBRA OPTICA	1/4	4	300	500	300
DIST. SECUNDARIA					
CABLE COAXIAL	1/4	140	300	90	90
FIBRA OPTICA	1/4	4	300	475	275

TABLA 4

	MICRO- ONDAS	CABLE COA- XIAL	PAR TELEFO NICO	SATE LITE	GUIA DE ONDA	FIBRA OPTICA
ESTACION TRANSMISORA	3	3	3	3	3	3
ENLACE DE LARGO ALCANCE	3	3	2	3	3	3
ENLACE DE CORTO ALCANCE	2	3	3	1	1	3
ENLACES ENTRE USUARIOS	1	2	3	1	1	3
ENLACES ENTRE LA CENTRAL Y USUARIOS	1	3	1	1	1	3
MILITAR	3	3	3	3	3	3
ENLACES ENTRE COMPUTADORES	1	3	1	1	1	3
CATV	3	3	1	3	1	3

TABLA 5

EQUIPO TRANSMISOR RECEPTOR DE SEÑALES  
DE VIDEO POR FIBRA OPTICA

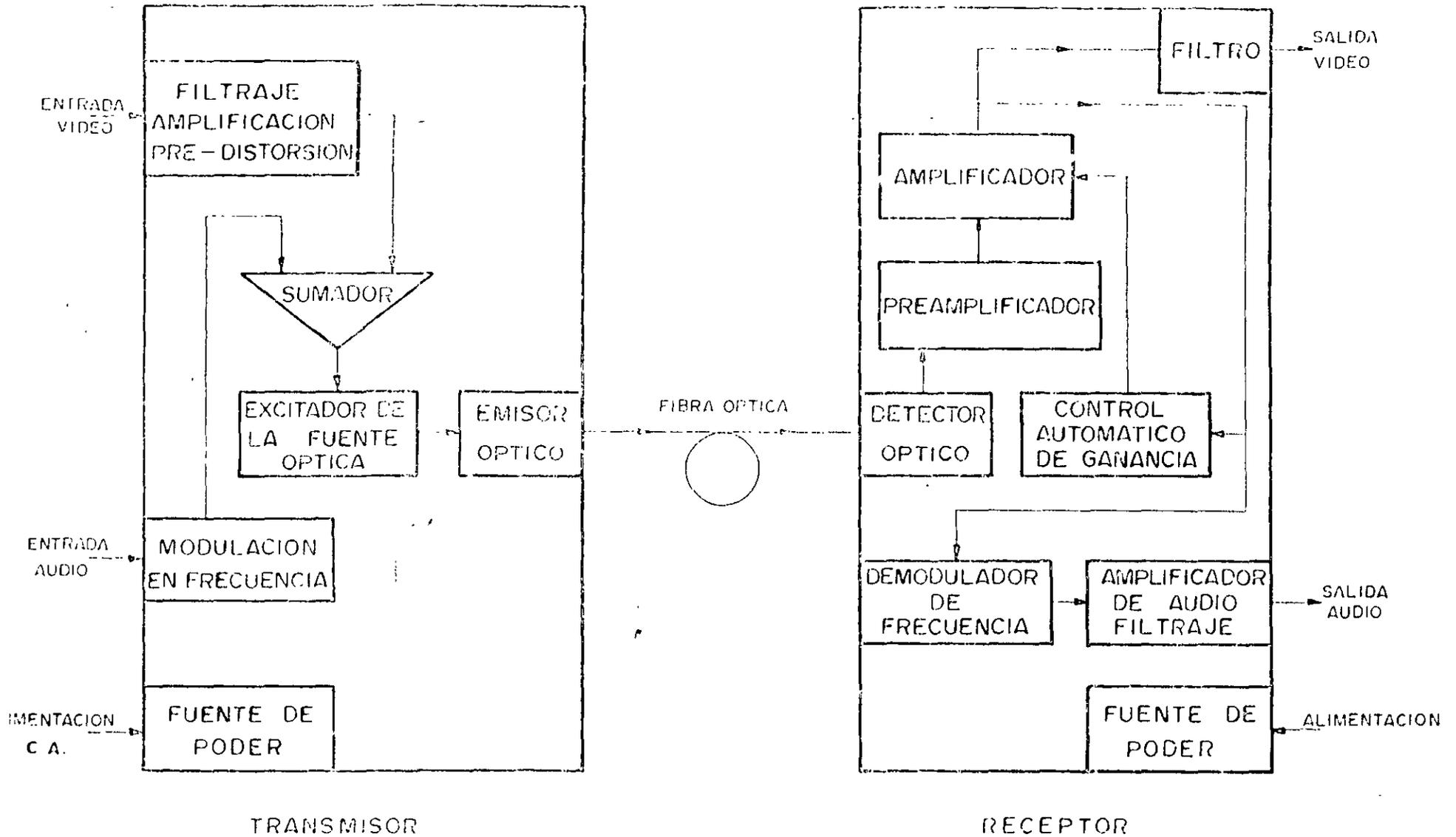


FIGURA 1. Sistema de transmisión analógica para señales de video.

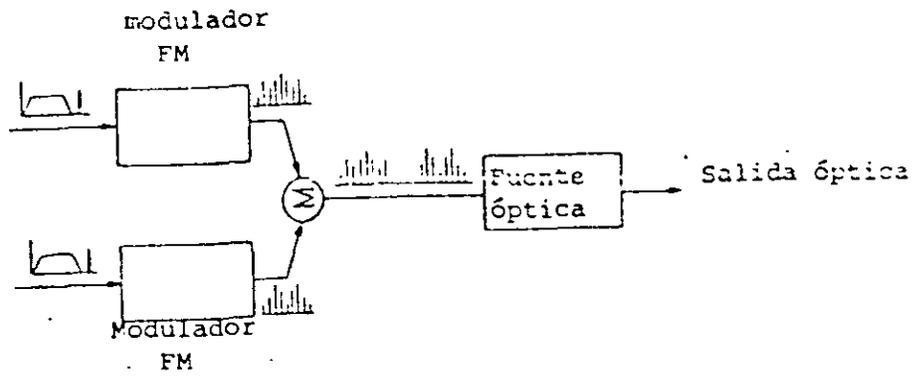


FIGURA 2. Multicanalización analógica por división en frecuencia.

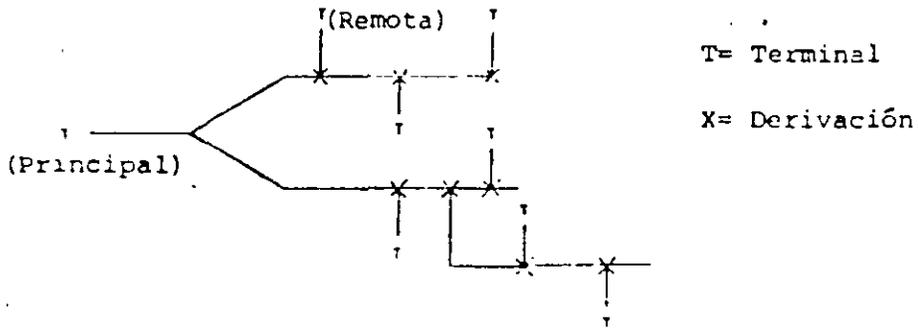


FIGURA 3. Red de distribución con topología de tipo árbol.

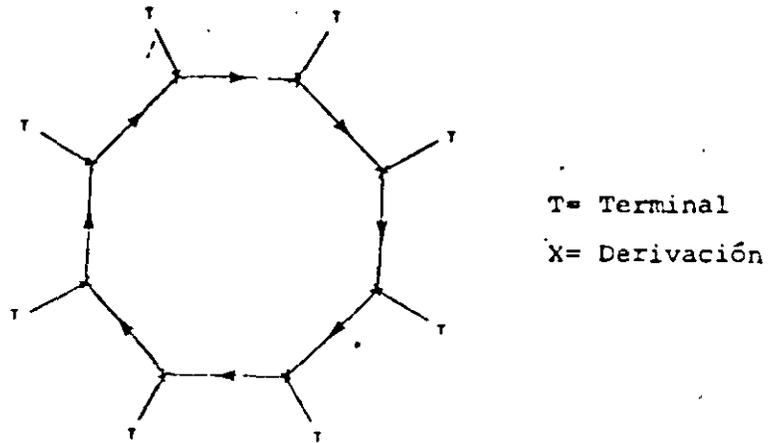


FIGURA 4. Red local tipo anillo

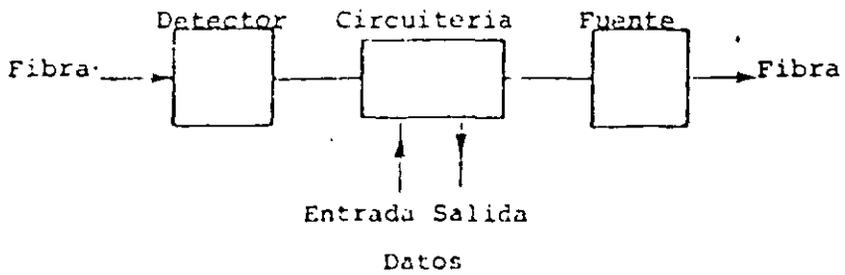


FIGURA 5. Sistema de derivación activo para red local por fibra óptica.

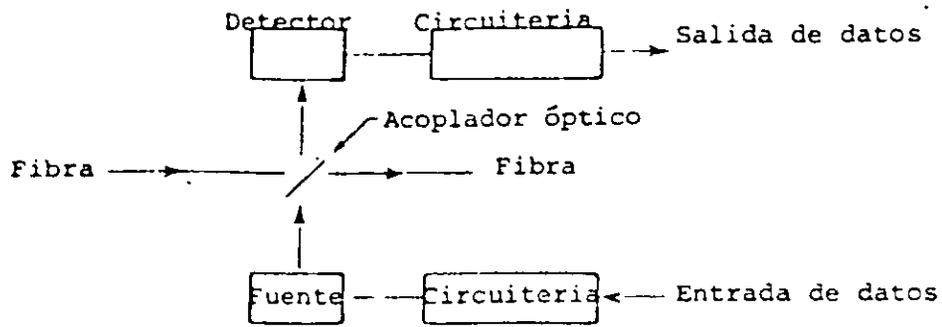


FIGURA 6. Sistema de derivación pasivo para red local por fibra óptica.

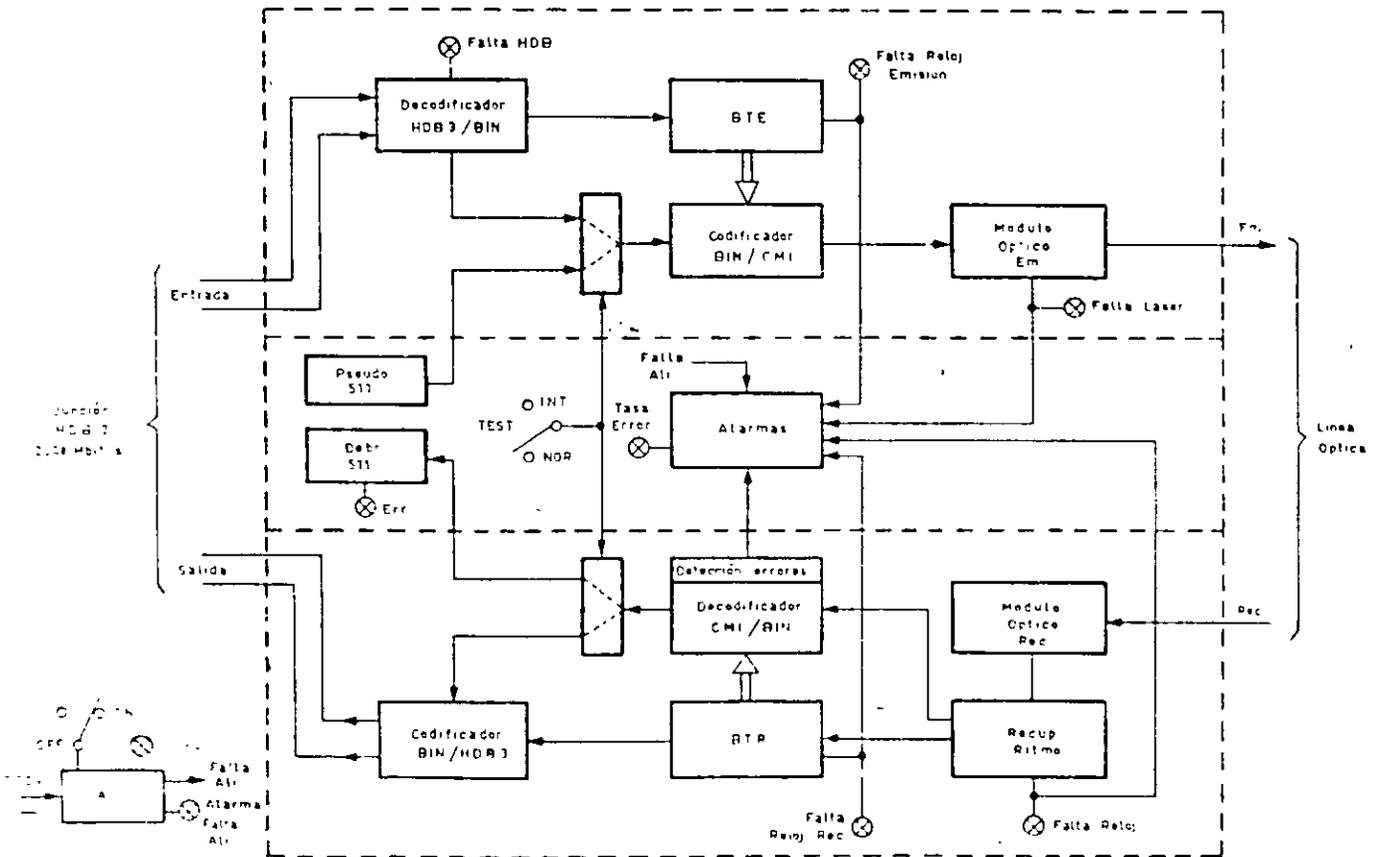


FIGURA 7. Equipo terminal de línea óptica para transmisión P.C.M.

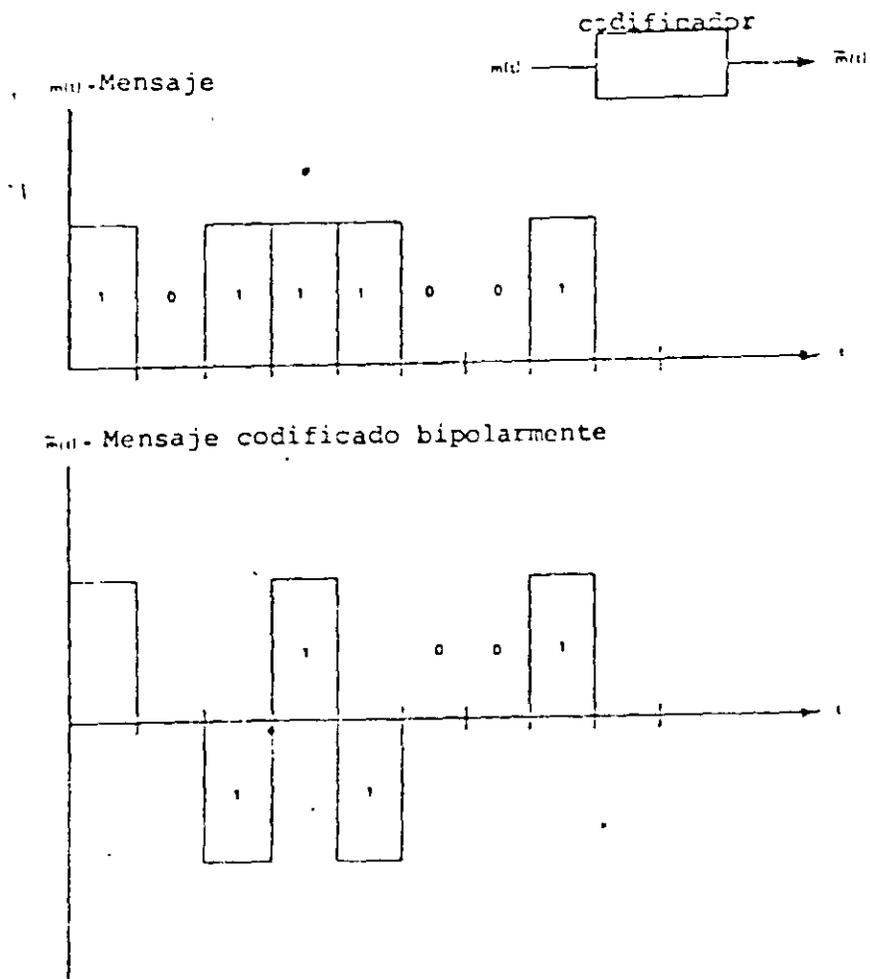


FIGURA 8. Codificación de línea bipolar

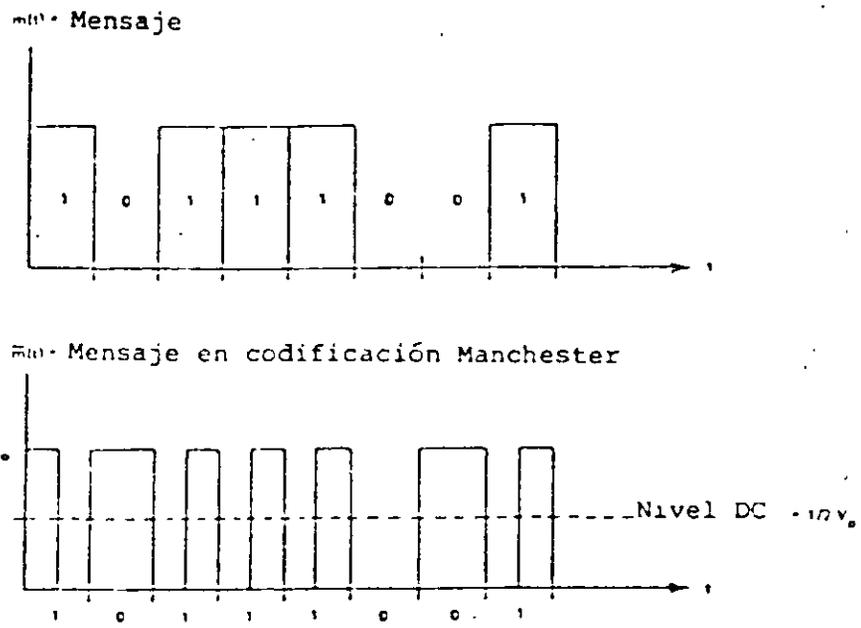


FIGURA 9. Código Manchester.

AMI/HDB-3	Potencia óptica
-1	0
0	$P_t$
+1	$2P_t$

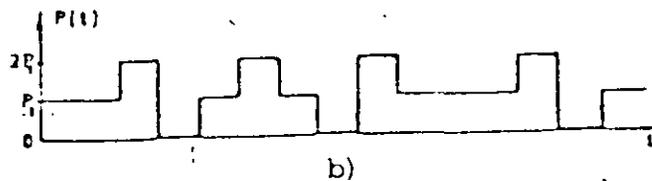


FIGURA 11. Transmisión de un código bipolar usando tres niveles de potencia óptica.

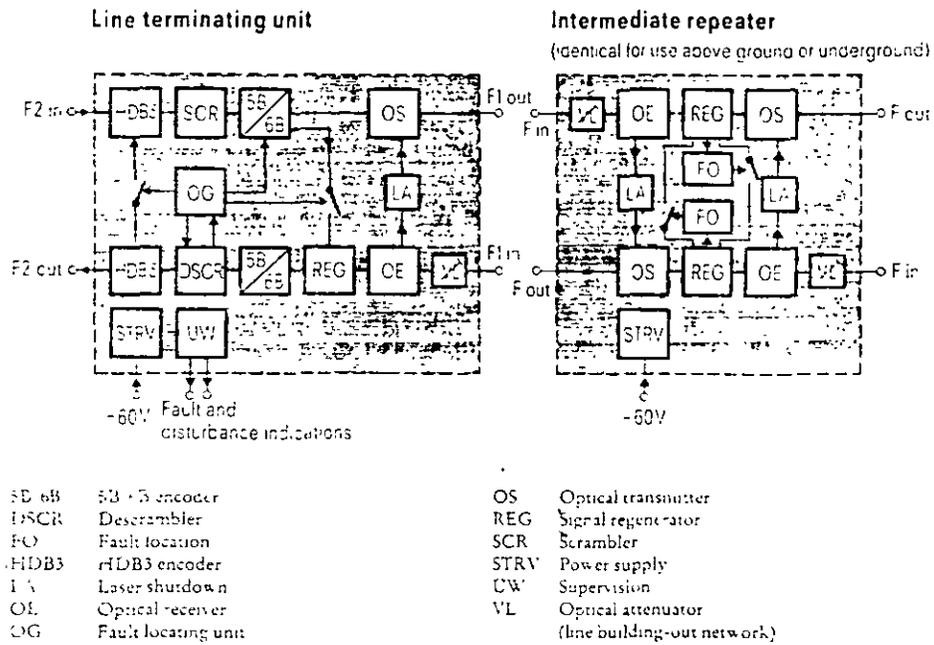


FIGURA 10. Equipo terminal de línea para comunicaciones digitales por fibra óptica.

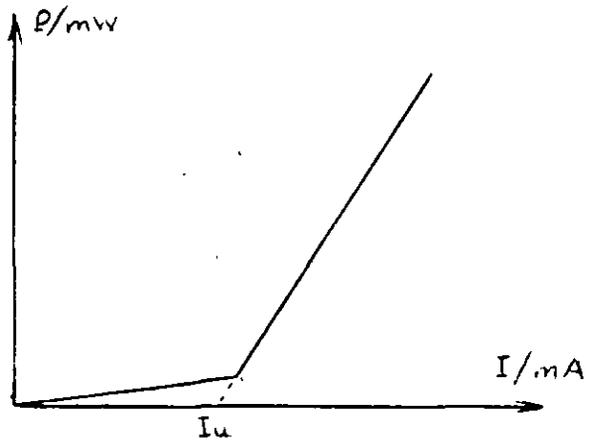


FIGURA 12 Respuesta de un diodo láser.

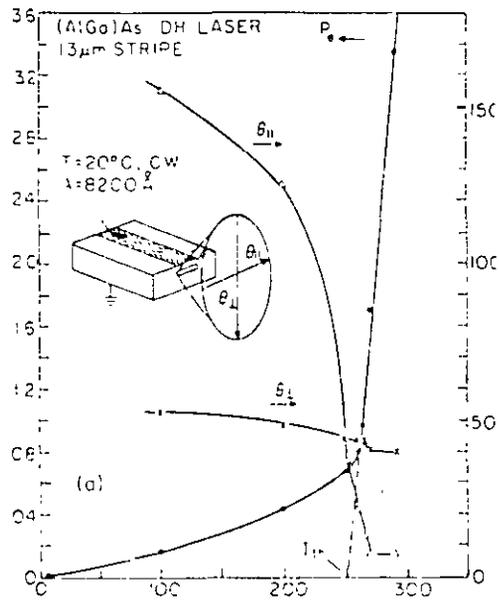


FIGURA 13 Angostamiento espacial del haz láser con la corriente de inyección.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**



**CONFERENCISTA  
DR. FRANCISCO J. MENDIETA JIMÉNEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

## MEDICION

### CARACTERIZACION DE FIBRAS OPTICAS

La determinación de las propiedades físicas y de transmisión de una fibra óptica es una necesidad bajo muchos puntos de vista: investigación experimental, acompañamiento o seguimiento durante la producción, proyecto de un sistema, evaluación de una instalación, etc.

Han sido desarrollados diversos métodos de medición que deben ser precisos y prácticos en la utilización, debiéndose establecer patrones internacionales de referencia.

Los parámetros de mayor interés en una fibra óptica para quien proyecta un sistema y que son normalmente presentados como datos de catálogo son:

- Diámetro del núcleo
- Diámetro del cladding
- Atenuación
- Dispersión o ancho de banda
- Apertura numérica
- Perfil de índice de refracción

Otros parámetros más específicos, relacionados o no con los anteriores son de interés solamente para quien desarrolla un proceso productivo y no serán discutidos aquí.

La presentación de los métodos de medición será primero para fibras multimodo y posteriormente para fibras unimodo.

### DISTRIBUCION MODAL DE EQUILIBRIO

La determinación exacta de las propiedades de transmisión de una fibra multimodo encuentra una dificultad fundamental: cada uno de los muchos modos de propagación de la fibra muestra un comportamiento particular, tanto del punto de vista de atenuación como en el atraso en tiempo de propagación.

Además de este comportamiento diferenciado entre los modos, se suma también el fenómeno de transparencia de potencia entre ellos, o acoplamiento entre modos. Este acoplamiento está asociado a perturbaciones geométricas o de composición de la fibra y en fibras de buena calidad es causado por fenómenos externos como microcurvaturas o uniones.

De esta forma, tanto atenuación como ancho de banda de una fibra multimodo no están definidos exactamente, pero dependen de las condiciones de excitación de la fibra, y también de las perturbaciones que favorecen o no el acoplamiento entre modos. Otra consecuencia de esta distribución de potencia y acoplamiento entre los modos es que la atenuación y el ancho de banda no son generalmente funciones lineales con la longitud y, por lo tanto, una extrapolación de valores obtenidos para longitudes diferentes es siempre válida.

Se verifica también que después de cierta longitud de fibra la transferencia de energía entre los modos, producirá una distribución de modos que a partir de ahí, se propaga inalterada, desde que la fibra no esté sujeta a grandes perturbaciones mecánicas. Este es el llamado estado estacionario de propagación o distribución de equilibrio.

#### 1.- MEDIDA DE LA ATENUACION

Las señales luminosas que se propagan a lo largo de una fibra sufren atenuación, o sea, una pérdida de energía debido a procesos de absorción e irradiación. En la mayoría de los casos y especialmente para quien proyecta un sistema, el parámetro más importante es la atenuación total de la fibra que engloba todos los factores de causa sin distinción. Los procesos que causan atenuación están en función de la longitud de onda y, por lo tanto, una medida de atenuación en función de la longitud de onda (atenuación espectral) es siempre útil pues permite identificar regiones de menor pérdida para una determinada fibra.

Para una fibra uniforme en condición de equilibrio, la atenuación para una determinada longitud de onda ( $\lambda$ ) entre dos puntos, 1 y 2, separados por una distancia L es dada por:

$$\alpha(\lambda) = 10 \log (P_1 / P_2) \text{ dB/km} \\ L \text{ (km)}$$

$P_1$  = Potencia luminosa en sección 1  
 $P_2$  = " " " " " 2

Por lo tanto, conociendo  $P_1$  y  $P_2$  y la longitud del tramo en cuestión, determinamos la atenuación de este tramo en dB/km. Tres métodos son empleados para la determinación de  $P_1$  y  $P_2$ :

### 1.1 Medida de la atenuación por "Cut-Back"

Esta técnica es una aplicación directa de la definición de atenuación anterior. Consiste en la determinación de la potencia óptica en dos puntos distintos de la fibra, una en el extremo de salida ( $P_2$ ) y la otra en un punto próximo al extremo de entrada ( $P_1$ ), después de efectuado un corte de fibra.

De esta manera mantenemos fijas las condiciones de prueba, aumentando la precisión de la medición.

Un esquema de un montaje típico de esta medida se muestra a continuación:

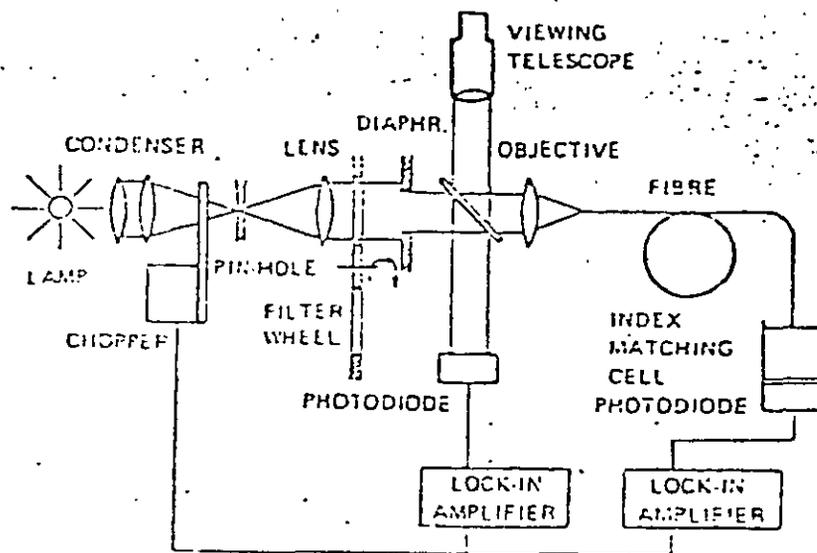


Fig. 1.1 Esquema del conjunto de medición de atenuación por el método "Cut-Back"

Para medidas espectrales, la fuente luminosa debe ser de gran capacidad espectral, luz blanca y un monocromador o filtro para seleccionar la longitud de onda de la medición.

La luz enviada en la fibra debe satisfacer las condiciones de equilibrio.

La luz pasa por un modulador mecánico (chopper) que permitirá una detección sincronizada, suprimiendo de esta forma la influencia de la luz ambiental.

La detección de la señal óptica normalmente se hace por un fotodiodo de silicio para longitud de onda hasta 1800 nm.

Este tipo de medición tiene el inconveniente de ser destructiva (siempre se pierde un trecho inicial de 1 a 2 metros donde se hace el enlace), y de requerir acceso a las dos extremidades de la fibra en el lugar de medición, siendo difícil en caso de cable instalado.

### 1.2 Medida de la atenuación por Inserción

Es una técnica que deriva de la anterior, utilizando inclusive el mismo equipo.

Se determina la potencia de salida de la fibra como en el caso anterior y se admite conocida la potencia de entrada, lo cual no siempre es verdadero. Esto requiere una calibración del equipo para determinar la potencia acoplada a la fibra, además de ventajas de no ser destructivo y no exigir el acceso a las dos extremidades de la fibra junto al equipo detector.

Como desventaja, es menos preciso que el método anterior, debido a lo incierto en la potencia enviada en la fibra.

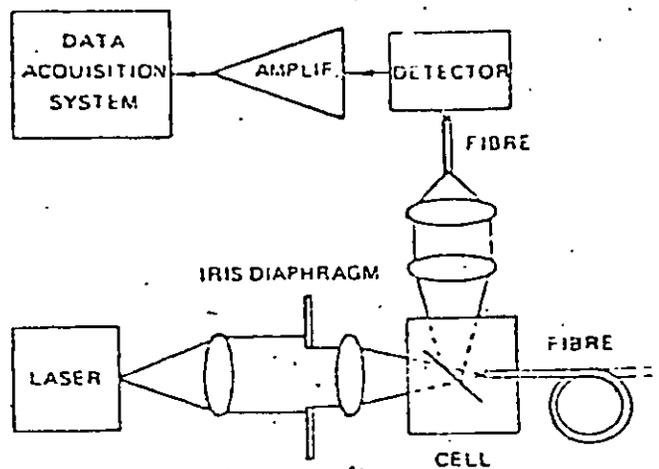
### 1.3 Medida de la atenuación por Retroesparcimiento (Backscattering)

Esta técnica consiste en la inyección de un impulso luminoso en una extremidad de la fibra y en el monitoreo (en la misma extremidad), de la luz que es retrodifundida a medida que se propaga.

El principio teórico del método se fundamenta en el mecanismo de esparcimiento Rayleigh, el cual origina un esparcimiento de la energía lumínica en todas direcciones, con una distribución proporcional a  $1 + \cos^2(\theta)$ , y donde  $\theta$  representa el ángulo entre la dirección de propagación, en el sentido de transmisión, y la de retroesparcimiento.

De la energía que se esparce en cada punto de la fibra, sólo una fracción,  $S$ , se mantiene dentro del núcleo y regresa hacia el extremo por el cual se había inyectado la luz.

Esta luz retrodifundida será guiada por la fibra y puede ser detectada en la misma extremidad de inyección a través de un sistema óptico conveniente. Un montaje típico para esta medida es el siguiente:



Montaje del sistema de medición de atenuación por el método de retrodifusión.

De esta forma, para cada instante a partir de la inyección del impulso en la extremidad de la fibra una señal retroesparcida correspondiente a un determinado punto de la fibra.

Sabiendo la velocidad de propagación de la luz en la fibra, si observamos la señal retroesparcida en un osciloscopio, podemos calibrar la escala de tiempos en unidades de longitud de fibra y obtendremos una figura que nos muestra el comportamiento de la luz a lo largo de la fibra.

Recordando que los impulsos retroesparcidos observados recorren un determinado trecho de fibra dos veces (ida y vuelta), la señal observada corresponde a dos veces el tiempo de recorrido de la fibra y la atenuación de la fibra puede calcularse por:

$$\alpha = \frac{20}{(t_s - t_0) \cdot v_g} \log P_s / P_e \text{ [dB / Km]}$$

- $v_g$  = Velocidad de propagación de la luz en la fibra
- $t_s$  = Tiempo de salida del impulso de luz en la fibra (km/s)
- $t_0$  = Tiempo inicial
- $P_s$  = Potencia de salida
- $P_e$  = Potencia de entrada

Este método es bastante interesante porque además de que no es destructivo y necesitar solo una extremidad de la fibra para ser medida, también proporciona informaciones detalladas de atenuación de señal a lo largo de la fibra, permitiendo la localización y determinación de la atenuación en uniones y defectos localizados además de ser bastante repetitiva. Como desventajas no permite medidas espectrales, trabaja con señales muy bajas, obligando al uso de procesos sofisticados de filtrado.

## 2.- MEDIDA DE LA RESPUESTA EN BANDA BASE.

Varios mecanismos de alargamiento de impulso están presentes en una fibra óptica, incluyendo la dispersión modal, material y de guía de onda. Por lo tanto, es importante especificar las condiciones en que se hace la medición (longitud de onda y ancho espectral de la fuente, geometría del lanzamiento, etc.) de modo a dar significado al valor de banda pasante obtenido. Para la determinación de la capacidad de transmisión de la fibra, dos valores pueden medirse, la respuesta al impulso en el dominio del tiempo y la función de transferencia en el dominio de las frecuencias. Si la fibra tuviera comportamiento lineal en potencia se puede mostrar que la respuesta al impulso y la función de transferencia están ligadas por la transformada de Fourier. Por lo tanto, en principio es posible pasar de un valor a otro matemáticamente.

### 2.1 Medida en el Dominio del Tiempo:

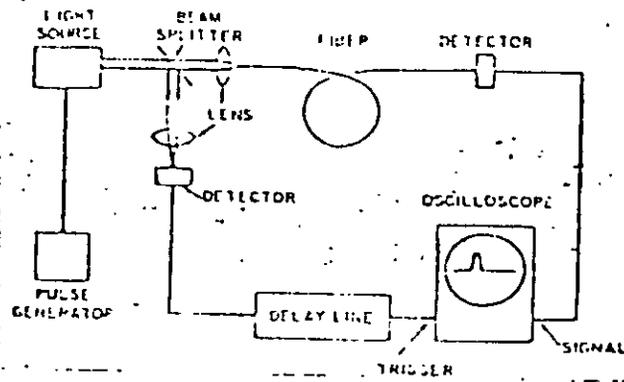
La manera más simple de obtener la respuesta a impulso de una fibra es enviando un impulso lumínico estrecho a través de la fibra y detectando el impulso de salida en la otra extremidad.

Si los impulsos fueran Gaussianos, la respuesta al impulso o alargamiento de impulso puede ser dada por la fórmula:

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

Donde  $\sigma_f$ ,  $\sigma_s$  y  $\sigma_e$  son las magnitudes de respuesta al impulso, del impulso de salida al de entrada, respectivamente.

Un montaje experimental para esta medida es el siguiente:



Esquema de medición de banda por el método impulsivo.

Si los impulsos no fueran Gaussianos, se debe usar una desconvolución para obtener la respuesta al impulso.

La banda pasante puede obtenerse aplicando una transformada de Fourier a la respuesta al impulso. En la práctica son calculadas las transformadas de Fourier de los impulsos de entrada y salida, y una función de transferencia se calcula por la relación entre las transformadas.

La dispersión tiene unidades ns/km, además no varía linealmente con la longitud de la fibra.

## 2.2 Medida en el Dominio de Frecuencia

La función de transferencia  $G(\omega)$  de una fibra puede ser directamente calculada por transformada de Fourier y a partir de  $g(t)$ , como se vió anteriormente. Como errores experimentales y de cálculo reducen, algunas veces, la precisión de esta medida, siendo interesante la obtención de  $G(\omega)$  en el dominio de las frecuencias directamente. Un esquema para esta medida es como sigue:

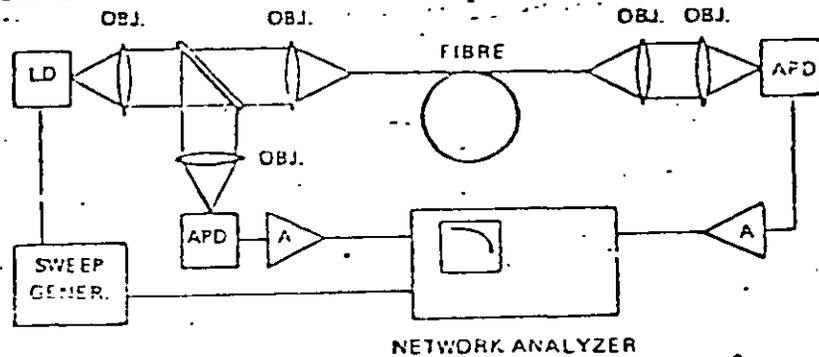


Diagrama de medición de banda en el dominio de frecuencia

Una fuente luminosa (láser) es modulada senoidalmente con frecuencia variable. La luz modulada es introducida en la fibra, cuya salida es detectada y enviada a un analizador de espectro o de red registrada. La misma medida se hace en un trecho corto de fibra (referencia) y el módulo de función de transferencia está dado por:

$$G(\omega) = P_s(\omega)/P_e(\omega)$$

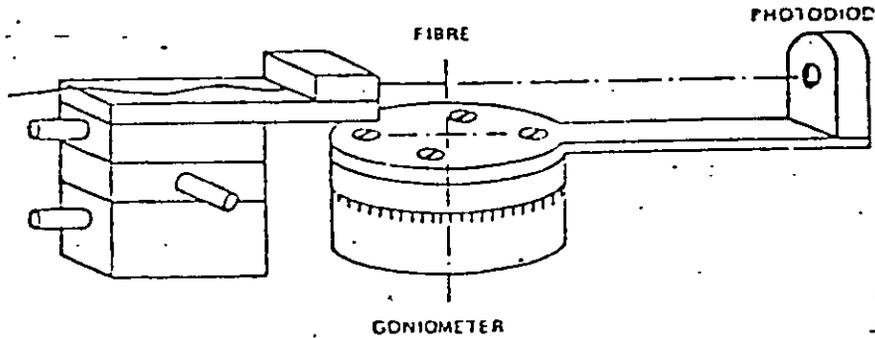
donde:  $P_s(\omega)$  es la señal de salida de fibra  
 $P_e(\omega)$  es la señal de salida de referencia o de entrada de la fibra.

### 3.- MEDIDA DE ABERTURA NUMERICA

La abertura numérica se calcula fácilmente a partir de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento. Para una fibra con salto de índice, ésta posee un único valor y corresponde al ángulo máximo de aceptación de luz. Para fibras de índice gradual debemos definir una abertura numérica local para cada punto de núcleo, después el índice de refracción varía en función del radio.

Si no disponemos de los valores de índice de refracción para el cálculo, podemos determinar la abertura numérica a través de un análisis de campo distante irradiado por un tramo corto de fibra ( $\sim 1\text{m}$ ).

Un montaje experimental para la medida de campo distante es la siguiente:



Medición de Abertura Numérica

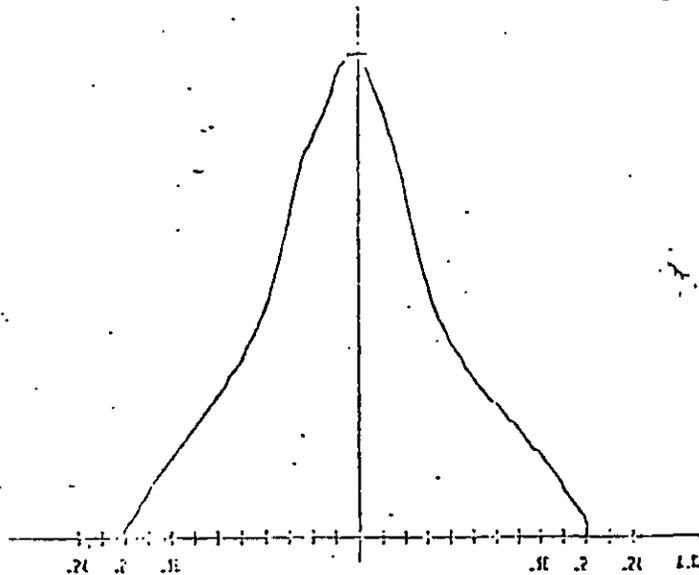
El fotodiodo hace un barrido angular y determina los puntos entre los cuales está concentrada la mayor parte (99%) de luz irradiada por la fibra. El seno de la mitad del ángulo formado entre estos dos puntos equivale a dos veces la abertura numérica de la fibra.

La siguiente figura muestra un ejemplo de la medida:

FIGURA 1 F50405/A

DATA 11/05/84

ABERTURA NUMERICA A 500 1.2



#### 4.- MEDIDAS DIMENSIONALES

Es importante conocer las características dimensionales de la fibra, especialmente cuando se desea reducir las pérdidas de una unión. No solo los núcleos de las fibras deben tener la misma geometría sino también el revestimiento pues en la práctica, la mayoría de los conectores y dispositivos de unión utilizan una superficie externa de revestimiento como referencia para el alineamiento.

Un método simple para la verificación de los diámetros del núcleo y revestimiento y sus tolerancias consiste en la comparación fotográfica de la superficie de una fibra obtenida con el microscopio con una plantilla de cuatro círculos concéntricos, como se muestra a continuación:

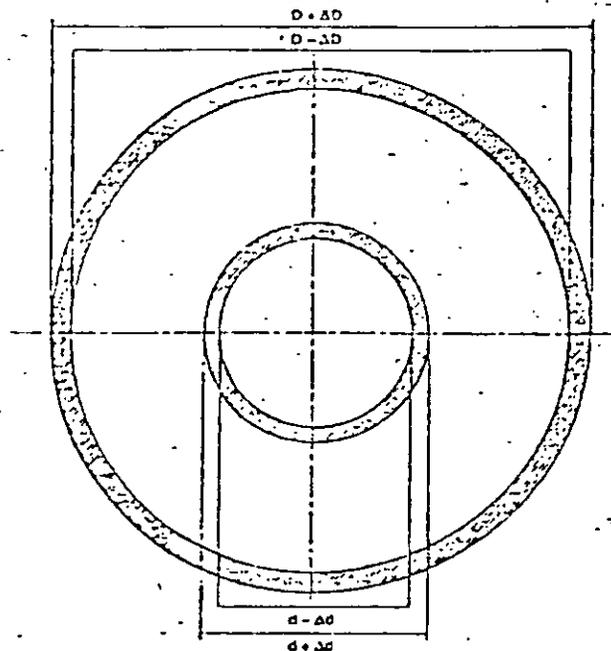


Figure 10- Tolerance field (template)

$d$  = core diameter (nominal)

$\Delta d$  = tolerance of the core diameter

$D$  = reference surface diameter (nominal)

$\Delta D$  = tolerance of the reference surface diameter

Caracterización Dimensional de la Fibra Optica

## MEDICION PARAMETROS TRANSMISION EN FIBRAS MONOMODO

### 1.- ATENUACION.

Las observaciones descritas para fibra multimodo son aplicables a la medición para fibras monomodo.

Se describe el método de corte adoptado por CCITT como método de referencia, al igual que para fibras multimodo.

#### 1.1 Método de Corte

Recordando que atenuación  $A(\lambda)$ , a la longitud de onda  $\lambda$ , entre dos secciones separadas una distancia  $L$ , como:

$$A(\lambda) = 10 \log (P_1 / P_2), \text{ dB}$$

Siendo  $P$  la potencia óptica transmitida en la sección 1 y  $P$  la potencia óptica que atraviesa la sección 2.

Cuando la fibra es uniforme, es factible definir la atenuación por unidad de longitud, o coeficiente de atenuación:

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

Con independencia de la longitud de la fibra.

Al igual que en fibras multimodo, el método de corte para fibras monomodo consiste en la aplicación estricta de la definición anterior, en donde los niveles  $P_1$  y  $P_2$  son los niveles de potencia medidos en dos puntos de la fibra sin modificar las condiciones de inyección.

#### 1.2 Retroesparcimiento

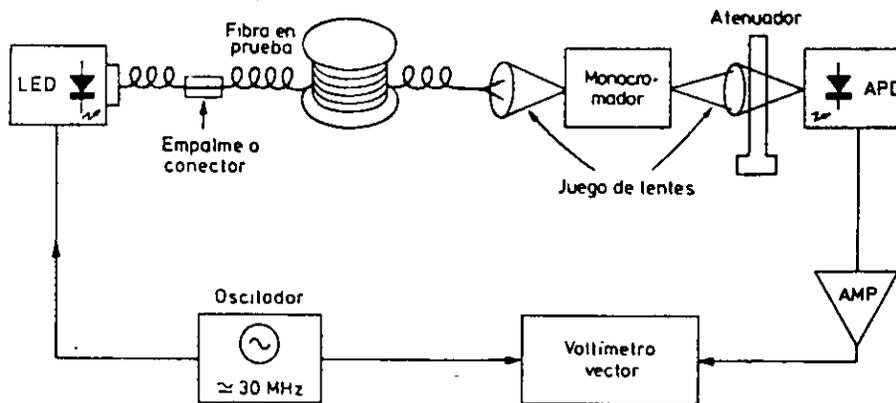
Los principios y metodología son idénticos a los ya expresados para las fibras multimodo. No obstante, hay diferencias en el nivel de la señal retroesparcida, que se manifiestan en un menor margen dinámico en las medidas sobre fibras monomodo que en las multimodo.

## 2.- MEDIDA DE DISPERSION TOTAL

Hasta el momento se han propuesto dos métodos que podrán ser válidos como métodos de referencia. Uno está basado en medidas en el dominio de la frecuencia, mediante LED, y el otro mide, en el dominio del tiempo, el retardo relativo entre impulsos emitidos a diferentes longitudes de onda.

### 2.1 Método de Desplazamiento de Fase (Dominio de frecuencia)

Este es un método reciente, se aplicó con éxito en 1981. Consiste en la medición sinusoidal de una señal óptica producida por LED de ancho espectro de emisión; la dispersión cromática se evalúa a través del desplazamiento de fase que sufre la señal modulada al ir variando la longitud de onda de emisión, ajustando un monocromador; por ejemplo:



Banco para medición de dispersión total en fibras monomodo por el método de retardo de fases.

Interesa acoplar correctamente la fibra bajo prueba con el monocromador. Es preciso conocer previamente las curvas de relación S/N de los diodos disponibles para las medidas.

El procedimiento de medida puede dividirse en tres etapas:

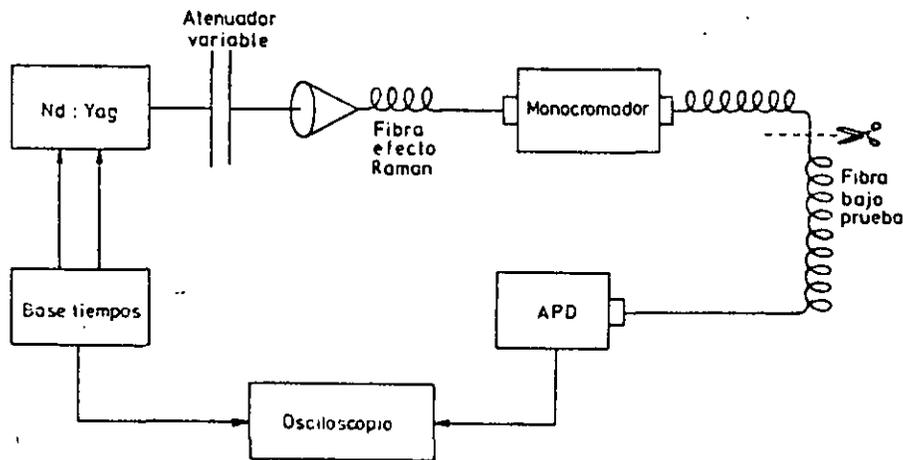
## 2.2 Método de Retardo de Impulsos (Dominio del tiempo)

Evalúa el retardo cromático,  $\tau(\lambda)$ , observando el retardo relativo entre impulsos muy estrechos, generados a distintas longitudes de onda.

La medida puede efectuarse en tres fases:

- Evaluación de retardos relativos de los impulsos, enviados a las longitudes de onda seleccionadas por el monocromador.
- Evaluación de retardos correspondientes al banco de prueba
- Obtención de la dispersión cromática derivando la curva

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^{-2} + C\lambda^2$$



Banco para la medida de la dispersión total por método de retardo de impulsos

### 3. LONGITUD DE ONDA DE CORTE;

Indica la frontera que separa el comportamiento multimodal del comportamiento monomodal de una fibra. Interesa trabajar por encima de  $\lambda_c$  para que la fibra se comporte como monomodo.

Las definiciones más usadas:

- a). La longitud de corte efectiva,  $\lambda_c$ , es aquella longitud de onda para la cual la atenuación de un tramo de fibra enrollado en un tambor de 20 mm excede en 0.1 dB la atenuación de la misma fibra, sujeta a una curvatura no inferior a 25 mm.
- b). Es la menor longitud de onda para la cual la atenuación del modo principal ( $LP_{01}$ ) y del primer modo de orden superior ( $LP_{11}$ ) difieren en un determinado valor, por ejemplo 10 dB/m.

Existen dos métodos de medida:

- a). El método de pérdidas por curvatura. El banco usado es el mismo que para atenuación. Con una fibra de aproximadamente 1 m., se registra la atenuación en una banda de 900 u/300 nm aproximadamente. Se repite la medida enrollando la fibra en un cilindro de 20 mm.

La diferencia de atenuación observada entre ambas medidas decrece bruscamente con la longitud de onda: La  $\lambda_c$  es aquella para la cual la diferencia es de 0.1 dB.

- b). El segundo método evalúa  $\lambda_c$  en función de la variación del diámetro de campo nodal con la longitud de onda,  $W_0(\lambda)$ . A medida que al ir subiendo en longitud de onda nos aproximamos a  $\lambda_c$ , el diámetro  $W_0(\lambda)$  experimental un decremento lineal con la longitud de onda, y vuelve a incrementarse para longitudes de onda superiores a la de corte.

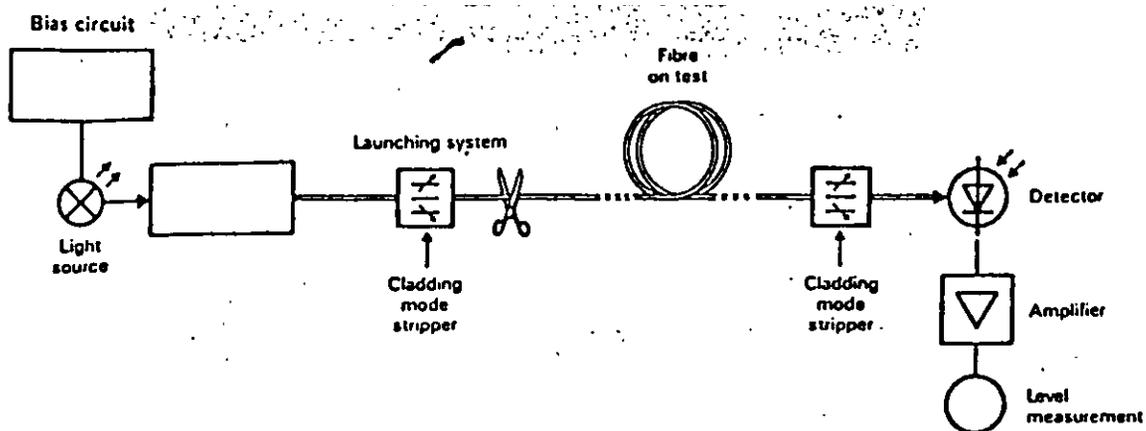
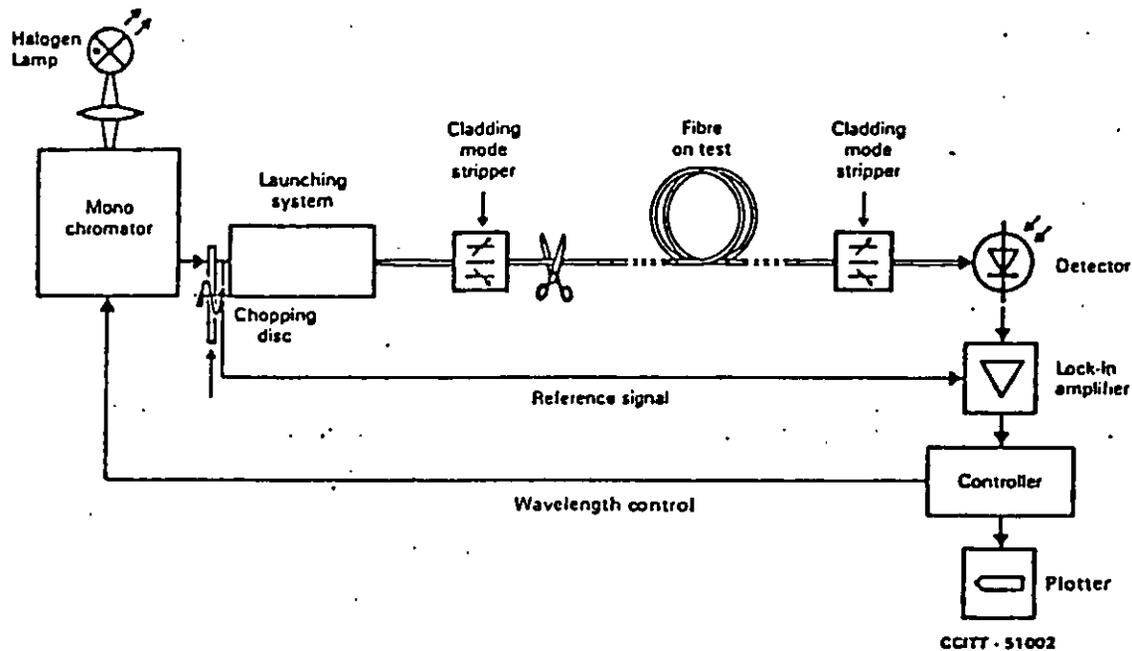


FIGURE B-10/G.651

CCITT - 49932\*

Arrangement of test equipment to make spot loss measurement

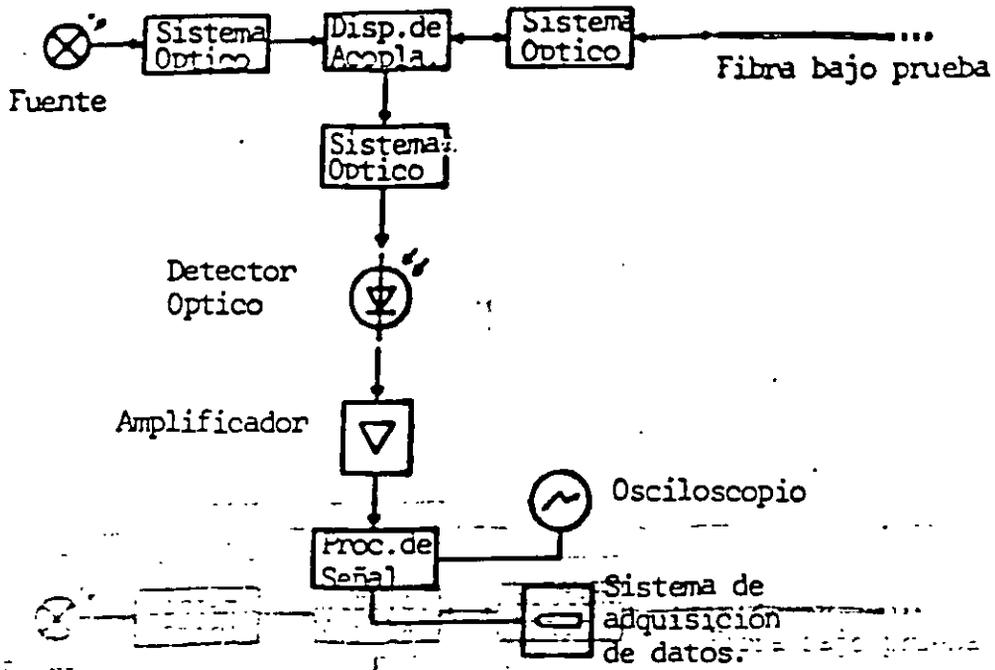


CCITT - 51002

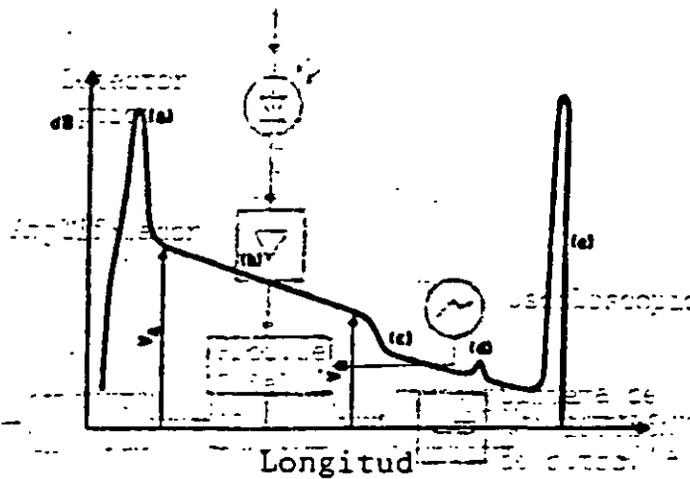
Arrangement of test equipment used to obtain the loss spectrum

FIGURE B-11/G.651

The cutback technique



a) Esquema del Aparato



b) Curva Típica

FIGURA 4.- TECNICA DE REFLECTOMETRIA



b) Curva Típica

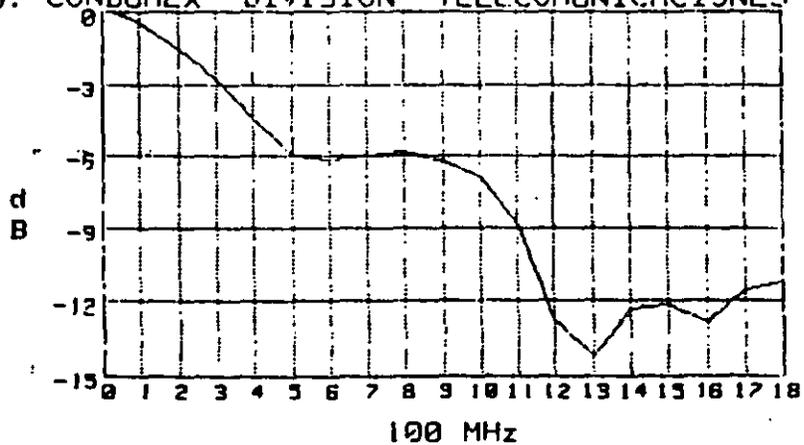
# ANCHO DE BANDA



**CONDUMEX**

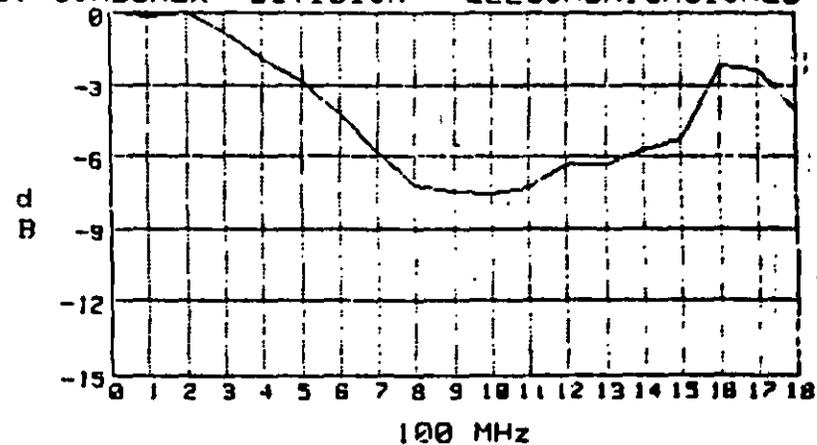
Division Telecomunicaciones

BARRIDO FRECUENCIA 330nm Long: 2.245km  
ID: CONDUMEX DIVISION TELECOMUNICACIONES



FREC CORTE a -3dB en 316MHz

BARRIDO FRECUENCIA 1332nm Long: 2.245km  
ID: CONDUMEX DIVISION TELECOMUNICACIONES



FREC CORTE a -3dB en 510MHz

# CONECTORES OPTICOS EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

## INTRODUCCION

Este curso pretende dar una visión del estado actual de la tecnología de los conectores para fibra óptica.

En el se exponen las distintas técnicas de conexión óptica, diseños de conectores y metodología de prueba así como los factores que intervienen en la calidad de la conexión por medio de conectores.

En un sistema eléctrico, es suficiente un contacto físico para unir dos conductores. En el caso de conectar dos fibras ópticas los requerimientos son mucho más críticos, ya que la señal óptica es transportada por el núcleo de la fibra, por lo que es necesario un preciso alineamiento entre los dos núcleos de las fibras.

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

Los empalmes se utilizan cuando se requiere una conexión permanente o semipermanente entre dos fibras y pueden ser elaborados por fusión o acoplamiento mecánico.

Los conectores son usados para dar flexibilidad y facilidad de conexión y desconexión entre sistemas de fibra y/o componentes activos (LED, LASER, PIN, APD, etc.).

## I. PRINCIPIOS DE CONECTORES OPTICOS

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

**Tabla 1. Causas de Pérdidas en una Conexión Óptica.**

<u>Intrínsecas</u>	<u>Extrínsecas</u>
*Distintos diámetros de núcleo	*Desplazamiento lateral
*Distinta apertura numérica	*Desalineación angular
*Excentricidad del núcleo	*Separación entre las caras de las fibras
	* Calidad del acabado

**I.1. Pérdidas Intrínsecas.**

**a. Distintos Diámetros de los Núcleos.**

Cuando se unen dos fibras con núcleos de distintos diámetros (Fig. 1A), el solapamiento de las dos áreas produce una pérdida tanto en la dirección del diámetro mayor al menor, como del menor al mayor.

En el primer caso, la pérdida es debida a que existe una cantidad de modos que se pierden al entrar directamente al revestimiento de la fibra con núcleo menor. La atenuación producida es:

$$A = - 10 \log \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

$d_1 - \varnothing$  del emisor  
 $d_2 - \varnothing$  del receptor

En el segundo caso ( $d_1 < d_2$ ), también existen pérdidas debido a una nueva redistribución modal, pero es menos significativa.

## Inta Apertura Numérica.

se conecta una fibra de apertura numérica mayor a otra de menor N.A. (Fig. 1B), se produce una pérdida por los modos que no "gula" o captan por la menor N.A. La atenuación está dada por la fórmula:

$$A = -10 \log \frac{NA_2^2}{NA_1^2}$$

$$A = 10 \log \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} = 10 \log \frac{\sin^2 \theta}{1}$$

1 - índice de refracción del núcleo.

2 - índice de refracción del revestimiento.

### Excentricidad del Núcleo.

La excentricidad del núcleo también causa pérdidas por solapamiento de las áreas.

### Pérdidas Extrínsecas.

#### Desplazamiento Lateral.

El desplazamiento lateral (Fig. 2.A) es debido a un error en la manufactura del conector y el efecto de reflexión que ocurre cuando hay excentricidad del núcleo produciéndose una atenuación de .75 dB para un desplazamiento lateral (L) / Diámetro (d) de .001. Estas tolerancias se hacen especialmente estrictas en conectores unimodales donde un error de 2 micras, produce una pérdida de .5 dB. La atenuación por este desplazamiento es igual a:

$$A = -10 \log \eta$$

donde  $\eta$  es la eficiencia del acoplamiento que se calcula por la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos \frac{\pi L}{d} - \frac{L}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{L}{d}\right)^2} \right\}$$

donde  $L$  en el denominador se calcula en radianes.

## **1.2b. Desalineación Angular.**

Cualquier ángulo entre las caras de las fibras produce pérdidas. La desalineación angular (Fig. 2.B) es producida por un mal pulido, corte de la fibra o por un mal diseño del conector. Esta pérdida depende de la apertura numérica de la fibra óptica, siendo menor la pérdida al aumentar la N.A. de la fibra.

La pérdida producida es:

$$A = - 10 \log \left( 1 - \frac{\sin^2 D}{NA^2} \right)$$

donde D es el ángulo en radianes entre las dos caras y  $n_0$  es el índice de refracción del material que está entre las dos caras, en el caso del aire  $n_0 = 1$ .

## **c. Separación entre las Caras de las Fibras.**

La separación entre las caras de las fibras ( Fig. 2.C ), tiene influencia en el aumento de atenuación en una interconexión óptica, siendo mayor a medida que aumenta la apertura numérica.

La atenuación se puede calcular así:

$$A = - 10 \log \left( 1 - \frac{X^2 NA^2}{2d n_0} \right)$$

donde X es la distancia entre caras.

## **d. Calidad en el Acabado de las Caras.**

Existe otra causa más para producir pérdidas entre conectores, y esta es la atenuación por el efecto Fresnel que ocurre cuando dos fibras están separadas por aire ( Fig. 2.D ). Esta pérdida aumenta con las imperfecciones de las caras de las fibras, por lo que se exige un pulido a espejo en la mayoría de conectores.

El efecto Fresnel consiste en pérdidas por reflexión que ocurren cuando la luz transmitida por la fibra óptica cambia de un índice de refracción a otro.

El coeficiente de reflexión es:

$$P = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

Las pérdidas por efecto Fresnel, se pueden disminuir incluso suprimir logrando un contacto físico entre las dos fibras eliminando así el cambio del índice de

refracción. Este procedimiento será posteriormente comentado en la sección dedicada al conector FC/PC.

Otro método frecuentemente usado, consiste en locar un fluido igualador de índice entre las dos caras de las fibras. Este método no es aconsejable debido a los problemas de limpieza y contaminación de las superficies pulidas que ocasiona el fluido.

## II. TIPOS DE CONECTORES .

La necesidad a mediados de los 70's de desarrollar conectores para fibra óptica dio lugar a que cada fabricante diseñara sus propios conectores ópticos, según su experiencia en otros campos. Así, compañías familiarizadas con dispositivos ópticos, se inclinaron hacia conectores que usaran lentes u otro sistema expander de haz (beam expander) en los extremos, para minimizar las pérdidas por desplazamientos. Por otra parte, las empresas que tenían dirigida su tecnología hacia la mecánica de precisión, como los fabricantes de conectores eléctricos, desarrollaron conectores de acoplamiento mecánico. En éstos, las fibras se encaran sin tener ningún elemento óptico entre ellas y solucionando sus problemas de desplazamiento desarrollando nuevas técnicas con menores tolerancias, nuevos sistemas de alineamiento y nuevos materiales que proporcionen mayor precisión y mayor resistencia mecánica. En el primer grupo se encuentran compañías como: Dorrán, Lamdek (filial de Kodak) y Deutch. En el segundo grupo (más numeroso) están: AMP, Amphenol, GTE, Interoptics, AT&T, OFTI y la mayor parte de las compañías japonesas fabricantes de conectores.

En los dos últimos años han surgido versiones de conectores que en un principio usaban la técnica de alineación por lente y ahora existen con tecnología de contacto entre fibras, como por ejemplo el conector bicónico de OFTI (ver Fig. 3a).

En la tabla 2 se presentan las distintas opciones en el diseño de conectores ópticos.

Cualquier intento de clasificación de conectores ópticos, es arriesgado, si bien últimamente se está adoptando la clasificación en base a las aplicaciones en las que el conector tiene ventajas más relevantes.

Bajo esta premisa, se pueden determinar dos grandes áreas de aplicación:

- Comunicaciones de pequeño y medio alcance, en los que se transmiten datos, señales de video o control en sistemas punto a punto o en redes locales, en los que normalmente se usa fibra

multimodo y el costo de los conectores es una parte importante del monto total del proyecto.

-Sistemas de largo alcance que transmiten señales de telefonía y/o datos a través de fibra unimodo y donde el costo de los conectores sólo representa una pequeña parte de todo el sistema.

## II.1. Evaluación de Conectores.

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

- \* Baja pérdida por inserción
- \* Facilidad de montaje
- \* Compatibilidad con distintos fabricantes del mismo conector
- \* Pequeña variación en la pérdida por inserción después de un gran número de conexiones y desconexiones (repetitividad).
- \* Insensibilidad a factores ambientales (temperatura, polvo, etc).
- \* Buena relación costo/beneficio.

## II.2. Conectores para Corto y Medio Alcance

### II.2a. El Conector SMA, un Conector Tipo.

Dentro de los muchos diseños, especificaciones y fabricantes de conectores para fibra multimodal, aproximadamente el 80% del mercado está cubierto con conectores SMA (Subminiatura tipo A) desarrollado por AMPHENOL PRODUCTS a mediados de los 70's. Este conector se ha convertido en un estándar respaldado por normas militares (MIL-1863A) y alrededor de cuarenta fabricantes; si bien su uso en nuevos productos, está en declive.

El SMA, tiene un costo adecuado, 10 a 25 dólares, es de fácil uso y la atenuación oscila de .5 dB a 2 dB, dependiendo de la versión. Las partes que constituyen un conector SMA, se pueden considerar básicas en el diseño de un conector óptico, por lo que vamos a describirlas detalladamente.

\* FERRULA.- Es la parte principal de un conector óptico, pues es el elemento que contiene en su interior la fibra óptica, ayudando a su alineación. En los conectores SMA, existen dos versiones de ferrula, tipo 905 ( Fig. 4.A ) y tipo 906 ( Fig. 4.B ). El tipo 905 es el diseño original y tiene una respuesta adecuada en empalmes terminales. Pero sus características resultan bajas cuando se requiera

**acoplamiento entre conectores:** Pensando en estas últimas aplicaciones, se diseñó el tipo 906 que soluciona en parte los problemas del 905 en cuestión de alineación. En el conector SMA, la longitud de la ferrula es crítica.

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

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

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

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

## **II.2b. Conector ST.**

El conector ST desarrollado por AT&T ( Fig. 5 ), está destinado a ser uno de los estándares en fibra multimodales, ya que distintas normas y fabricantes lo están recomendando para aplicaciones en LAN. Por ejemplo, IBM lo especifica en su red Token Ring.

El ST tiene una configuración parecida a la del conductor SMA, pero con características superiores. Sus ventajas son:

i. Ferrula cerámica de precisión, que mejora el alineación al tener tolerancias < 2 micras.

ii. Dispositivo de fijación, que evita la rotación, obteniendo así mayor repetitividad.

iii. La tuerca de acoplamiento no es roscada, sino del tipo bayoneta que hace que la conexión y desconexión sea más rápida.

iv. Atenuación típica de .4 dB.

## **II.3. Conectores para fibra unimodal.**

En aplicaciones donde se requiere un gran ancho de banda y una baja atenuación, como por ejemplo en compañías telefónicas, se hace necesario el uso de fibra unimodal. El 80% del mercado estadounidense de

conectores unimodo, está constituido por dos tipos que son: el NTT-FC y el bicbnico.

### II.3a. Conector NTT-FC.

El conector FC ( Fig. 6 ), fué en principio desarrollado para la NTT (Nippon Telephone and Telegraph) de Japón. Este conector consta de una ferrula metálica que contiene un elemento de cerámica capilar, que es el encargado de alinear la fibra. Las tolerancias de concentricidad y diámetro de orificio, no sobrepasan tolerancias de 1 micra, asegurando una atenuación menor de 1 dB. El FC incorpora una roldana de ajuste que asegura: i) optimización de la menor pérdida al tener ocho posiciones distintas, ii) mayor repetitividad al fijar la posición de la ferrula.

### II.3b. Conector FC/PC.

Como se comenta en el inciso B.2.d., parte de la luz incidente en el extremo pulido de una fibra, es reflejada debido al efecto Fresnel. En conectores unimodales convencionales esta reflexión se calcula en aproximadamente 3% de la luz incidente, lo cual equivale a .15 dB de atenuación por esta causa. Para eliminar la atenuación debido a esta causa sin usar un fluido igualador de índice, recientemente se ha desarrollado el conector de Contacto Físico FC/PC. fig.7 Para conseguir este contacto físico, se le proporciona a la terminación de las caras un pulido convexo que permite el contacto físico entre las dos caras. En la Tabla 3 se pueden comparar los valores típicos de atenuación del conector FC y FC/PC.

Tabla 3.

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

### **II.3c. Conector bicbnico.**

Desarrollado también por AT&T, el conector bicbnico ( Fig. 3b ) es otro de los conectores con gran aceptación en el campo de las telecomunicaciones en aplicaciones tanto multimodales como unimodales. Es usado en el IBM 3044 Fiber Optic Chanel que es un subsistema usado para comunicar computadoras y terminales. El conector bicbnico, es el dispositivo más popular de haz expandido. Consta de una ferrula cónica insertada en un cuerpo metálico y una tuerca de acoplamiento de material plástico. La cara de la fibra esta cubierta de epoxy moldeado que hace la función de una lente. Su pulido y ajuste es algo complejo, por lo que se han desarrollado versiones de acoplamiento fibra/fibra.

### **III. Procesos de ensamble.**

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

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

#### **III.1. Preparación del cable terminal ( pigtail ).**

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

#### **III.2. Ensamble del conector.**

En la segunda operación, se ensamblan las distintas partes del conector introduciendo la fibra por el orificio de la ferrula, no sin antes haber aplicado la resina epóxica. Se han conseguido buenos resultados utilizando resina epóxica de curado a 140 °C, debido principalmente a:

\* Facilidad en el manejo ya que el tiempo de vida de la mezcla es de 6 horas.

\* Rapidez en el ensamble del conector. En 4

minutos se consigue un curado por medio de una pistola de aire caliente, dando a la vez una indicación visual ya que se oscurece con el curado.

\* Es de baja viscosidad, característica indispensable en los conectores cerámicos, pues al tener gran longitud el orificio de la ferrula requeriría una fuerza excesiva en la inserción con un epoxy de alta viscosidad. Posteriormente se sujetan los elementos de tracción, se cura el epoxy y se corta la fibra sobrante.

### **III.3. Pulido.**

El pulido es la parte más delicada del proceso, tanto en el ensamble, como en el apego a las especificaciones del fabricante. El proceso puede ser manual o auxiliado de máquinas pulidoras, aunque para algunos tipos de conectores se exige que sea manual (FC/PC) o solo con máquina (FC). El procedimiento consta normalmente de tres pulidos:

- \* GRUESO (12 micras).
- \* MEDIO ( 3 micras).
- \* FINO (.3 micras).

Durante el proceso de pulido, se debe comprobar la longitud de la ferrula por medio de un calibrador adecuado e inspeccionar al acabado de la cara de la fibra.

### **IV. Procedimientos de prueba.**

La Electronic Industries Association ( EIA ), ha desarrollado varios procedimientos FOTP (Fiber Optic Test Procedure). La meta de estas recomendaciones, es conseguir una estandarización de los procedimientos de pruebas para que las mediciones sean aceptadas de manera general. En la Tabla 4, se enumeran los FOTP's más comunes para la evaluación de conectores.

#### **IV.1. El FOTP-171.**

Este es un procedimiento para la medida de atenuación por sustitución, para ensambles de cortas longitudes (menores a 100 mt) y fibra multimodal de índice gradual, o fibra unimodal. Esta FOTP cubre ensambles con conectores en uno, o en los dos extremos, ya sean del mismo o de diferente tipo de conectores.

Existen cuatro métodos distintos:

- \* METODO A. Prueba de concatenación (unión en serie de varios conectores), para ensambles con conectores iguales o distintos.
- \* METODO B. Para ensambles con los mismos conectores.
- \* METODO C. Para ensambles con distintos conectores en los extremos.
- \* METODO D. Para un conector en un solo extremo.

#### IV.1a. El método B.

Vamos a describir el método B, ya que es el más adecuado a nuestros requerimientos.

##### EQUIPO REQUERIDO:

- \* Fuente óptica estabilizada.
- \* Medidor de potencia óptica.
- \* Cable de referencia del emisor.
- \* Cable de referencia del receptor.
- \* Dos coples.

El cable de referencia del emisor, debe incorporar un simulador de equilibrio modal (EMS) cuando la fibra es multimodal, o un filtro de modos (N/F) cuando la fibra es unimodal. Un sencillo EMS se puede construir dándole cinco vueltas al cable multimodo alrededor de un cilindro de 20 mm de diámetro. El filtro de modos, consiste en una vuelta con un diámetro de 50 mm de cable unimodal.

El método se ilustra en la Fig. 8 y los pasos son los siguientes:

- i. Conectar la fuente óptica y el medidor por medio de los cables de referencia, usando un cople adecuado. Registrar en dBm la potencia óptica de los cables de referencia. Esta será la potencia inicial ( $P_0$ ).
- ii. Insertar entre los dos cables de referencia, el cable sujeto a prueba.
- iii. Registrar la potencia óptica ( $P_1$ ) en dBm.

iv. Repetir los pasos 2 y 3, tres veces; invertir los extremos del cable y repetir los pasos 2 y 3, tres veces más.

v. Calcular el valor promedio de las 7 mediciones.

$$P_{\text{prom.}} \text{ (dBm)} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 \dots + P_7}{7}$$

La Atenuación del Ensemble es:

$$A_t \text{ (dBm)} = P_0 - P_{\text{prom.}}$$

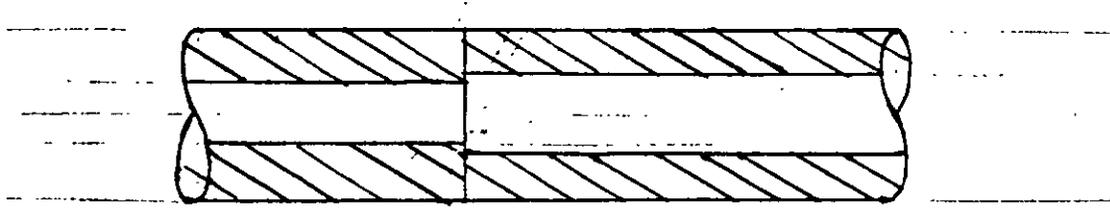
CONECTOR	TIPO FIBRA		TIPO CABLE	ACOPAMIENTO			
	NUCLEO	REVEST.		OPTICA	TIPO ALINEAMIENTO	MECANICO	SUJECCION
SENCILLO	VIDRIO	VIDRIO	MONO	TOPE	Ferrula cilindrica Ferrula conica Ferrula en V	PLUG-COPLE-PLUG	ROSCA
DUPLEX			DUPLEX		Ensamble pasivo Ensamble activo		
MULTI	PLAST.	PLAST.	MULTI	LENTE	Expansor de haz: —Lente liquido —Plastico moldeado	HERMAFRODITA	BAYONETA
0			HIBRIDO		—Lente esferica —Lente asferica		

Tabla 2. Variables en el diseño de conectores.

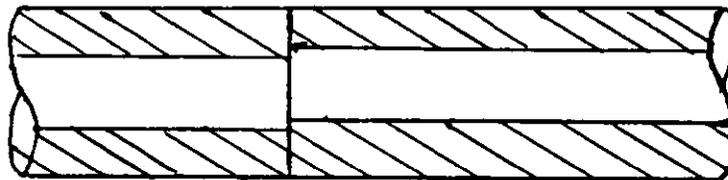
**TABLA 4. METODOS DE PRUEBA RECOMENDADOS POR LA EIA.**

<u>PARAMETRO</u>	<u>METODO DE PRUEBA</u>	<u>COMENTARIOS</u>
PERDIDA	FOTP-171-BP T	7 MEDICIONES
INSERCIONES	FOTP-21	500 CICLOS
IMPACTO	FOTP-2	CAIDA DESDE 1.8 mt, 8 VECES
TEMP. ALMAC.	FOTP-4	85 °C, 96 hs.
SHOCK TERMICO	FOTP-3	-20 °C A +65 °C 10 CICLOS
HUMEDAD	FOTP-5	40 °C, 90% A 95% HUMEDAD RELATIVA
TEMP. OPER.	FOTP-5	-20 °C A + 65 °C 10 CICLOS 20
FLEXION CICLOS	FOTP-1	90 GRADOS DE ARCO, 5 kg, 300 hs.

Fig. 1 PERDIDAS INTRINSECAS



a) Distinto diametro de núcleo



b) Excentricidad del núcleo.

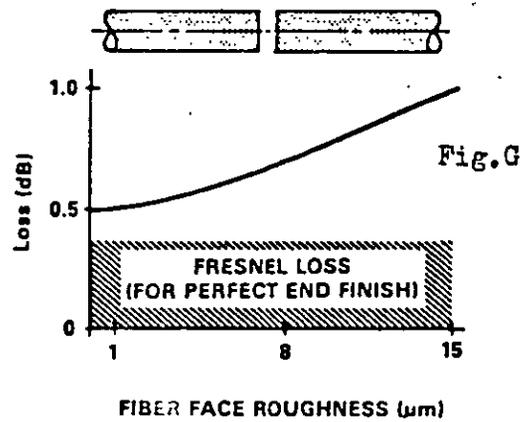
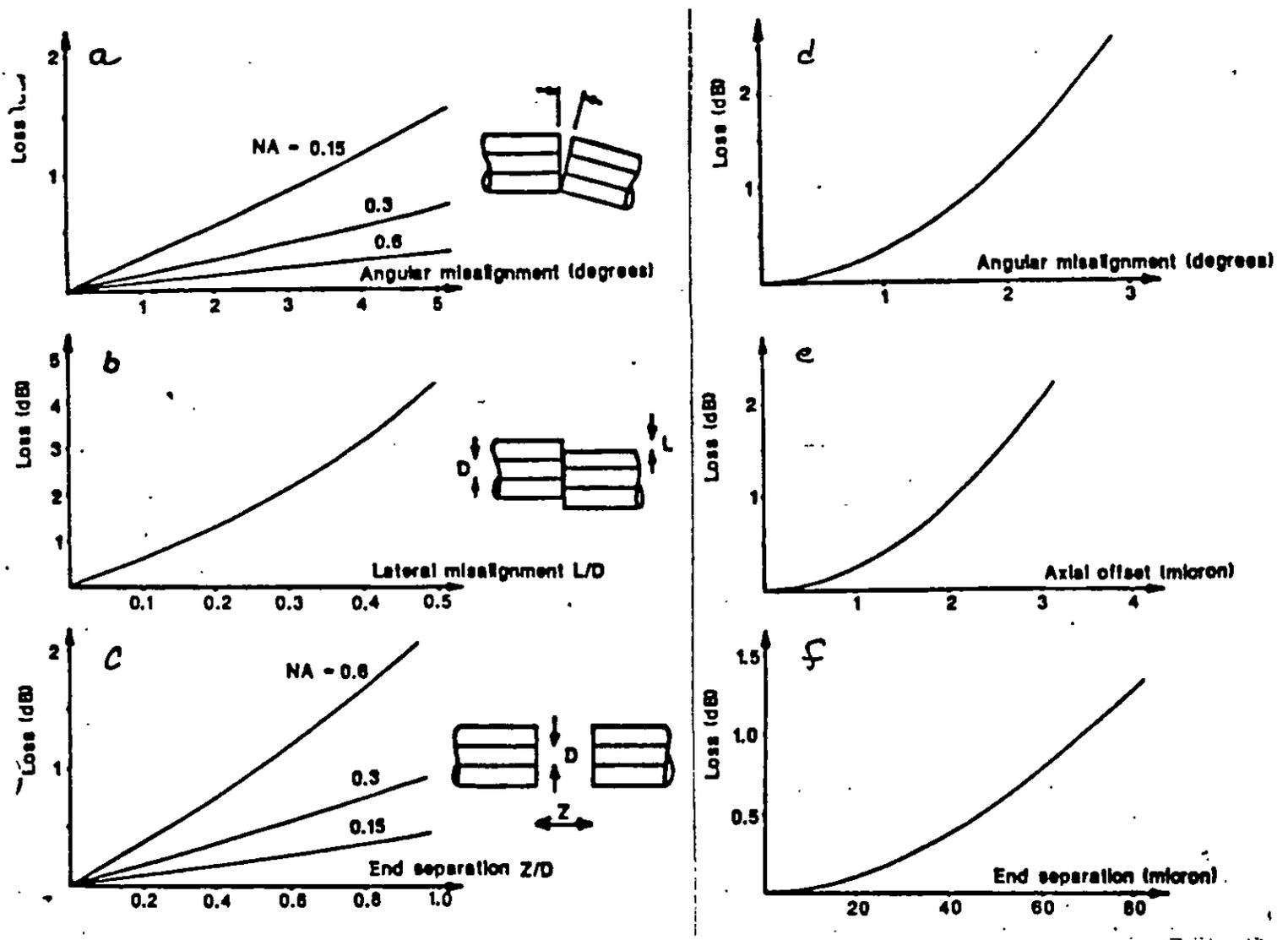


Fig.2 Pérdidas Extrínsecas. a-c y g) fibra multimodo  
d-f) fibra unimodo

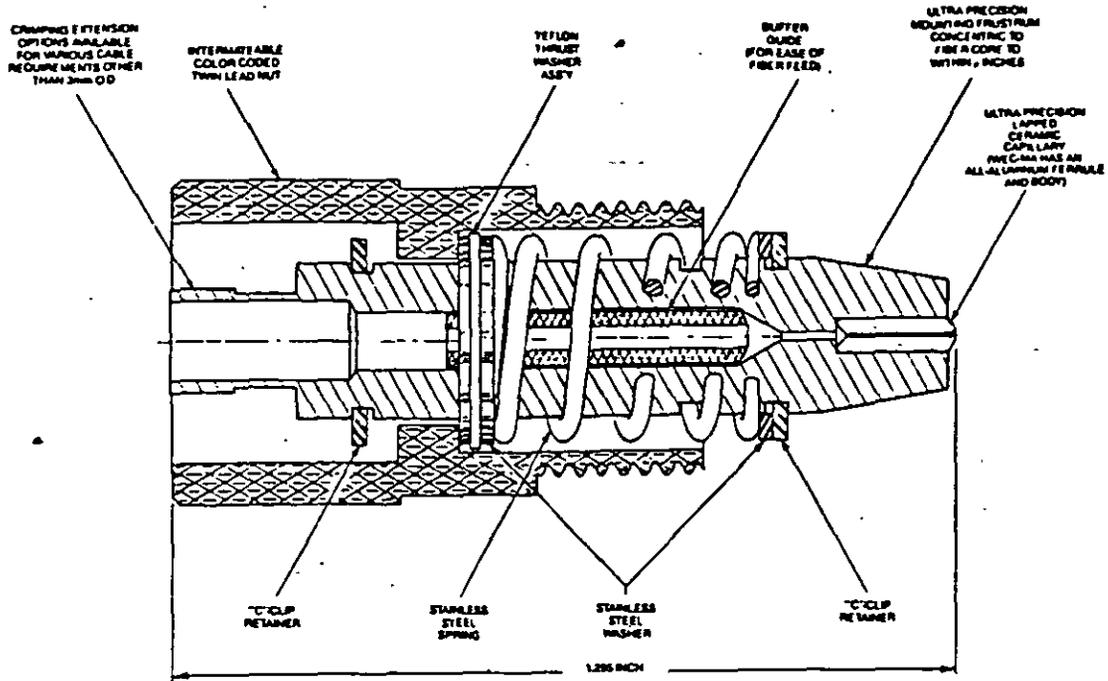


Fig 3a. Corte transversal conector biconico OFTI

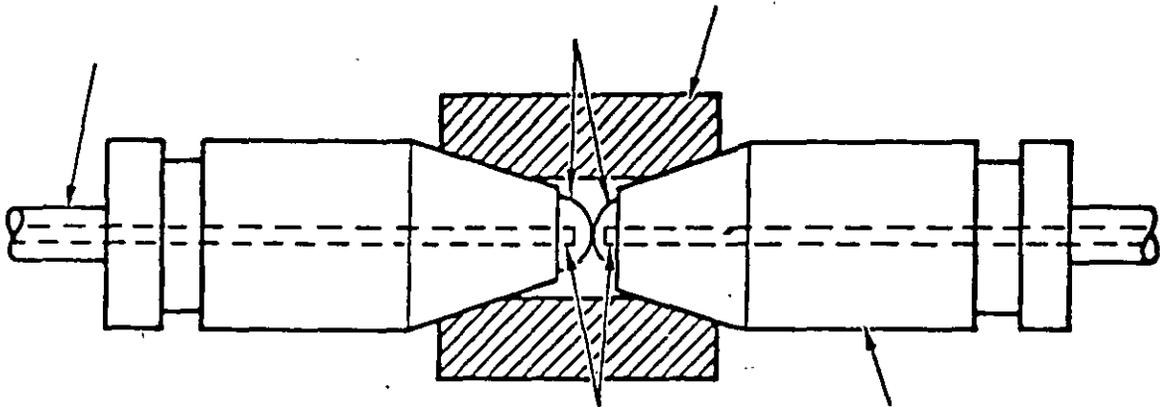
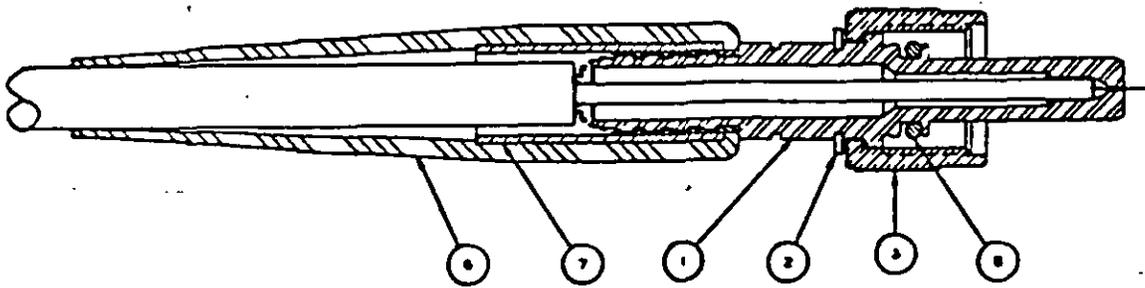
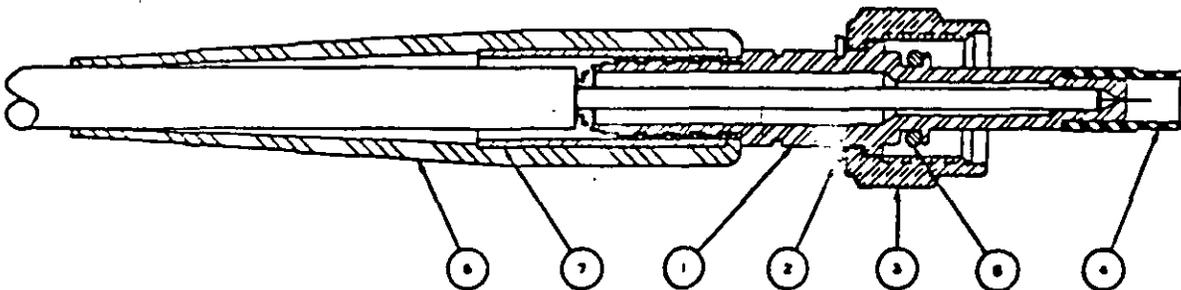


Fig. 3b. Corte transversal de una pareja de conectores bicónicos



21-1267-1	1	PCS	7	FERRULE
808-8040	1	PCS	6	BODY
809-8080-1	1	PCS	6	O-RING
808-8079	1	PCS	3	COUPLING NUT (TRAPEZOID)
801-8082	1	PCS	2	RETAINING RING
808-8084-8	1	PCS	1	BODY
PART NO.	QUAN	UN	LOC	DESCRIPTION
LIST OF MATERIAL				

Fig. 4a. Conector SMA tipo 905.



21-1267-1	1	PCS	7	FERRULE
808-8040	1	PCS	6	BODY
809-8080-1	1	PCS	6	O-RING
808-181-3003	1	PCS	4	ALIGNMENT SLEEVE
808-8080	1	PCS	3	COUPLING NUT
801-8082	1	PCS	2	RETAINING RING
808-8084-2	1	PCS	1	BODY
PART NO.	QUAN	UN	LOC	DESCRIPTION
LIST OF MATERIAL				

Fig. 4b. Conector SMA tipo 906.

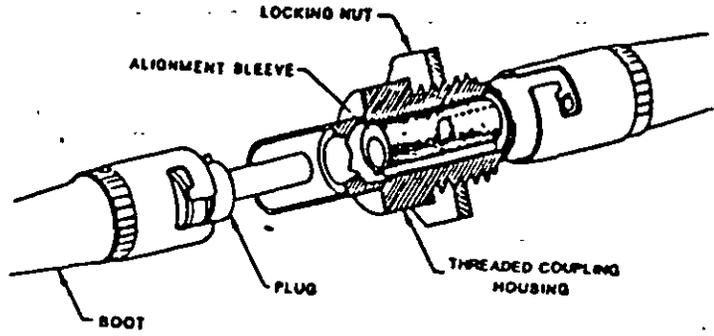


Fig. 5 Pareja de conectores ST con cople.

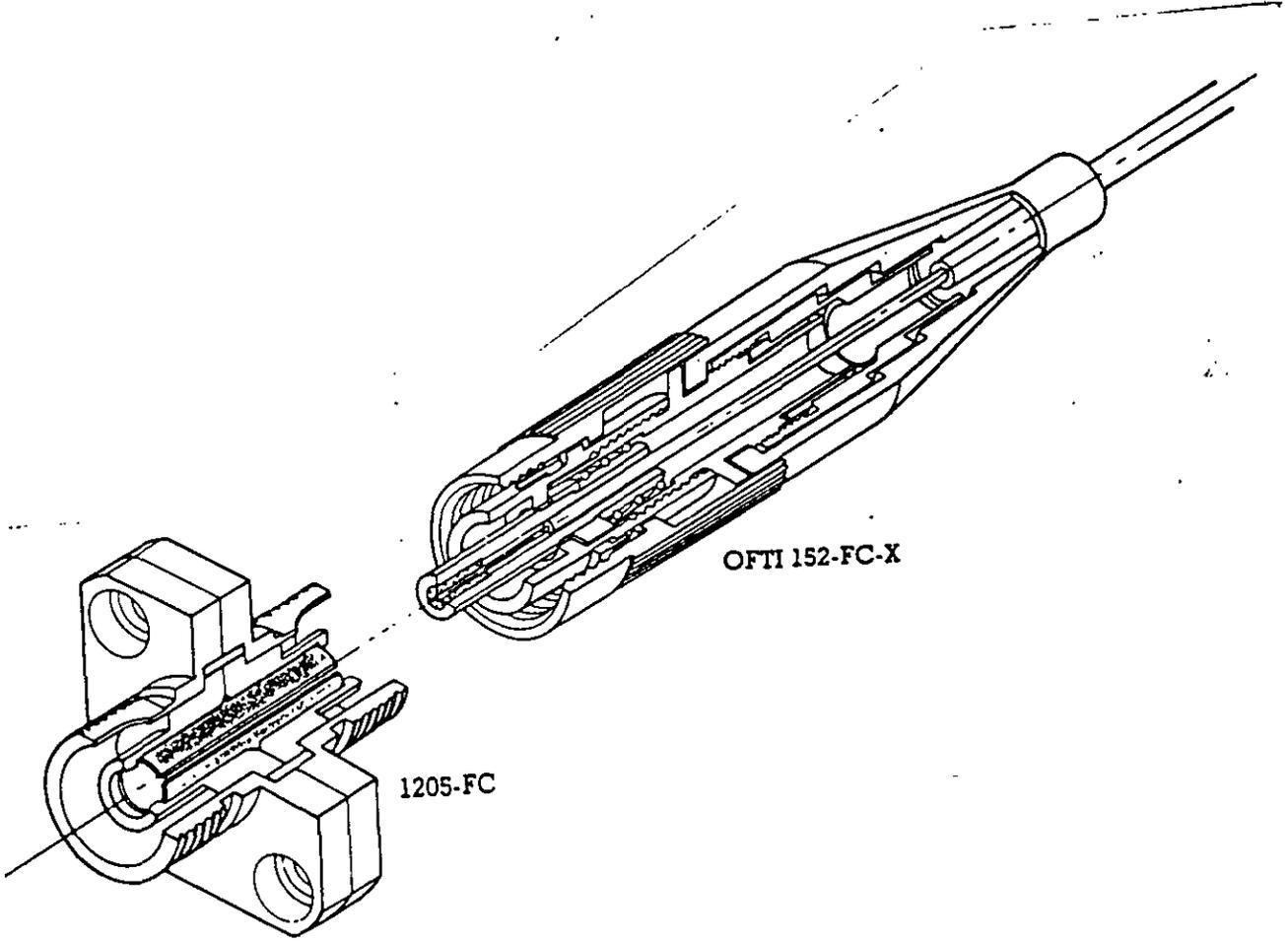
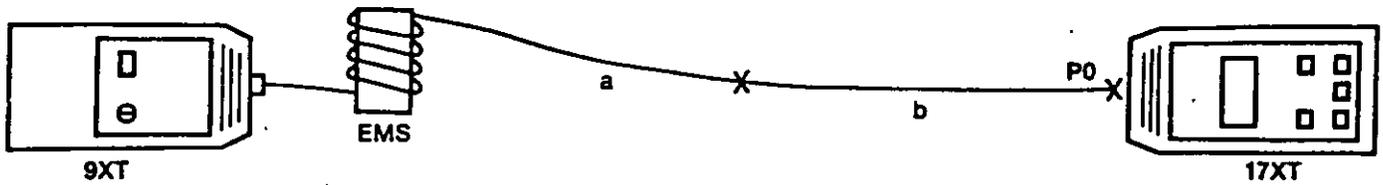
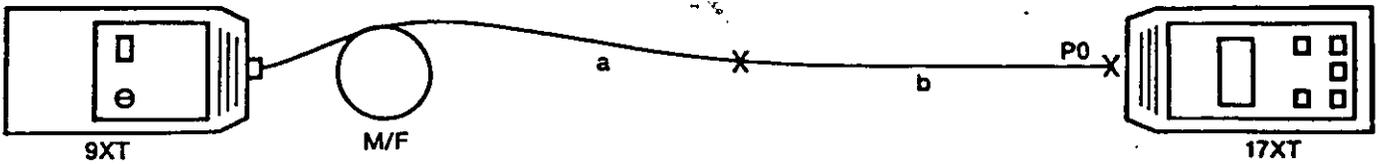


Fig.6 Corte transversal. Conector FC y cople.

METHOD B MULTIMODE WITH AN EMS



METHOD B SINGLEMODE WITH A MODE FILTER



a = Reference launch cable  
 b = Reference receive cable  
 c = Cable assembly under test

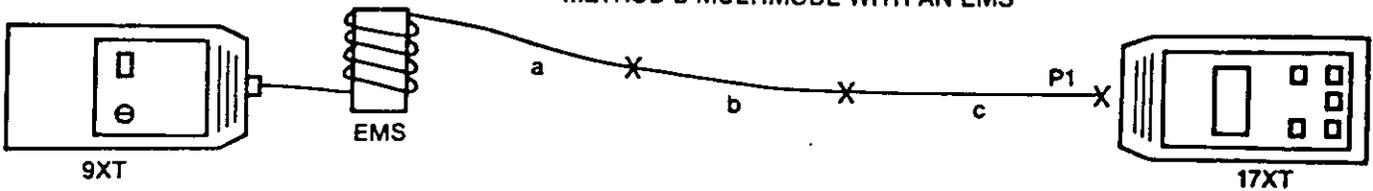
M/F = Mode filter (a 2 inch loop in your launch cable)

EMS = Equilibrium mode simulator (wrap 5 turns of your launch cable around a 0.788 inch rod)

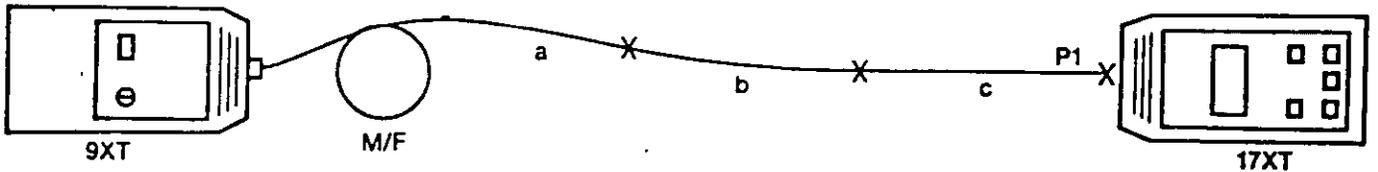
P0 = Initial reference power level

A) Medición de referencia.

METHOD B MULTIMODE WITH AN EMS



METHOD B SINGLEMODE WITH A MODE FILTER



a = Reference launch cable  
 b = Reference receive cable  
 c = Cable assembly under test

M/F = Mode filter (a 2 inch loop in your launch cable)

EMS = Equilibrium mode simulator (wrap 5 turns of your launch cable around a 0.788 inch rod)

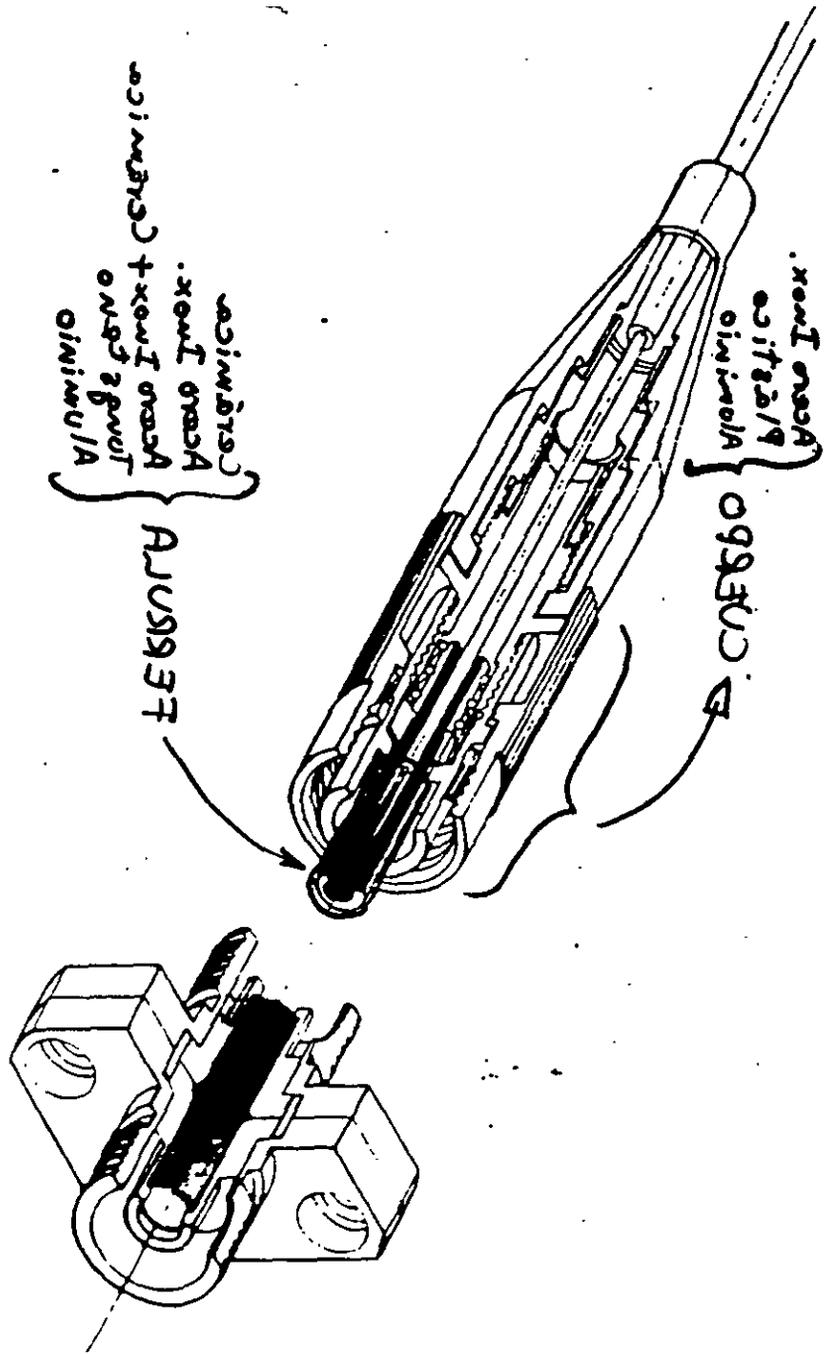
P1 = 1st test cable power measurement

B) Medición del cable.

Fig. 8 Método FOTP-171-B.

Fig. 1 Construction of EC Connector

Соединитель (connector) 31902



# HIGH PERFORMANCE RADIAL SINGLEMODE FIBER CONNECTOR

# VFO SERIES

## RADIALL'S SINGLEMODE OPTICAL FIBER CONNECTOR

Singlemode technology has advanced to the point where both undersea and ground systems are now being planned for service in the mid 1980's. Connectors for such systems are now available but the tolerances necessary to align  $8\ \mu\text{m}$  fiber cores, require very good connection systems. One practical strategy for meeting this challenge is to use the RADIALL OPTABALL SYSTEM.

The majority of singlemode fiber connectors reported are based on ultra-high precision machining technologies, the passive alignment method requires excellent geometrical properties of the fibers and manufacturing tolerances of submicron orders for the main connector parts. Some active alignment procedures have been proposed to reduce the insertion loss, in which the eccentricity of the fiber core to the axis is removed by trimming or grinding the ferrule (or plug) mating surface. High-precision machines with a sophisticated optical collimating system are necessary. The plug is generally terminated in a laboratory with a pigtail.

To meet the growing needs for a low-loss, truly field installable and low cost single mode connector, we have developed a new type of connector based on the sphere/cone mating mechanism «OPTABALL» used in multimode fiber connectors.

Fig. 1 illustrates the mating system. The principle of the system is based on the contact between a sphere located in the center of the adaptor and the concave conical end-faces of two identical plugs. The connection is established at the center of the sphere. The only element in our connector which requires a high level of accuracy is the sphere. The lateral misalignment of the fibers is mainly affected by the sphericity of the sphere. The tolerance on the diameter of the sphere only influences the separation between the ends of the fibers.

One can easily find commercial ball bearings with a diametric tolerance of  $1\ \mu\text{m}$  and a sphericity of better than  $0.2\ \mu\text{m}$  which satisfy the requirements of the alignment tolerance for the singlemode connections.

The angular misalignment can be held down to  $0.4^\circ$  per plug by a freely sliding fit at the entrance to the adaptor. The result is a plug that can be inserted into the adaptor until firm contact is made between the cone and the sphere. There is almost no friction between the fitted surfaces.

In addition all the connector parts can be made by traditional machine shop processes with a tolerance no more than  $0.02\ \text{mm}$ . This significantly reduces the price of our connectors.

Fig. 2 shows the plug structure. Firstly the fiber is bonded within a metal ferrule. Then the fiber end is polished by means of a special tool, until there is a gap of several  $\mu\text{m}$  of the end-face with reference to the center of the sphere. The ferrule together with a cylindrical piece is maintained in its position by a compression spring.

The alignment of the fiber core in relation to the axis of the sphere is achieved by the lateral sliding of the cylindrical piece onto the rear plane of the conical piece.

A simple microscope with a magnification of 900 for visualizing the fiber core, has been constructed. At the front of a lens, there is an adjustment tool including essentially a sphere which is identical to that used for the adaptor. The lens focuses at the center of the sphere. The fiber is illuminated transversely by a powerful white light source through a hole filled with resin at the rear of the plug. After mounting the plug onto the tool, one can observe the image of the fiber core through the ocular. The image consists of several colored diffraction rings.

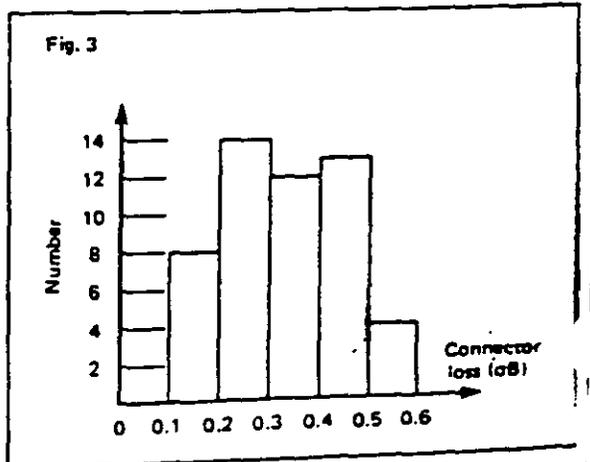
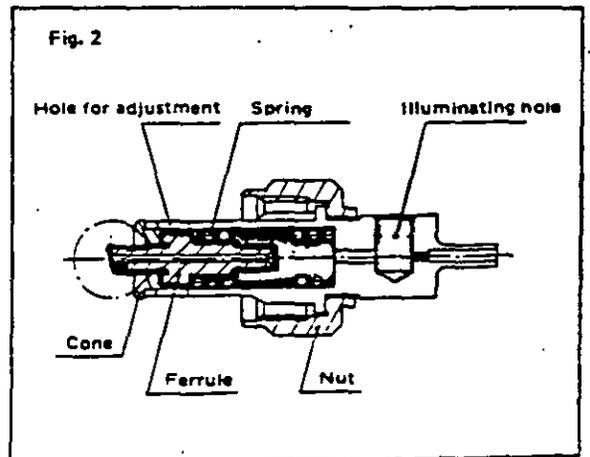
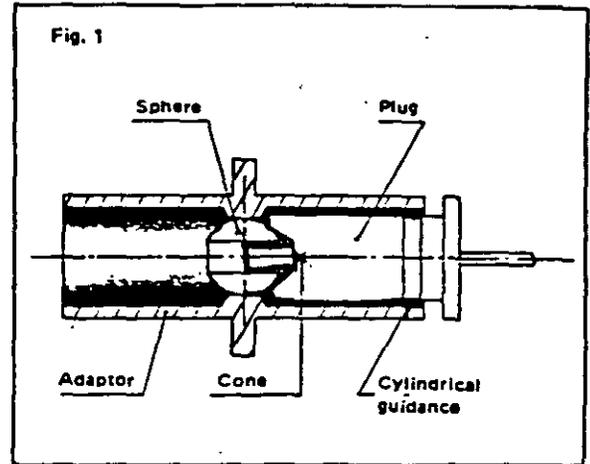
By means of four differential screws one can easily position the center of the fiber core in coincidence with the center of the reticle.

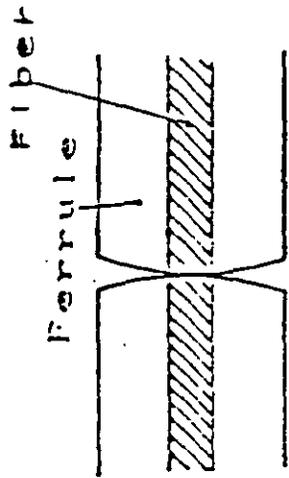
After the adjustment, the cylindrical piece is glued to the cone to ensure the ability to resist shocks. The total assembly time is less than 30 minutes per plug.

The design target was set such that the average lateral offset of two fibers could be maintained under  $1.3\ \mu\text{m}$  and the angular tilt less than  $0.4^\circ$ . From the resolution of the microscope lens, better than  $0.5\ \mu\text{m}$ , we can estimate the alignment accuracy to be better than  $0.7\ \mu\text{m}$  per plug. The average lateral and angular offsets should be less than  $1.1\ \mu\text{m}$  and  $0.4^\circ$  respectively after the two plugs have been mated.

A diagram of insertion loss measured at  $1.3\ \mu\text{m}$  for 50 connectors is shown in fig. 3. The mean loss being  $0.34\ \text{dB}$  with a standard deviation of  $0.14\ \text{dB}$ . The repeatability is better than  $\pm 0.1\ \text{dB}$  for a minimum of 200 matings.

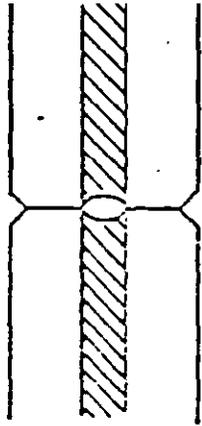
The connectors were assessed in field trials and these performances were confirmed. To reduce Fabry-Perrot interference effects and Fresnel loss, the fiber ends were index-matched. The measured level of the connector reflection retrodiffused into the light source is below  $-40\ \text{dB}$ . The measured maximum transmission fluctuations as a function of the separation between the fiber ends is  $0.02\ \text{dB}$  instead of  $0.7\ \text{dB}$  for dry connections. These results show that we have successfully achieved the design of an easily field installable, high quality and low cost singlemode connector.





PC

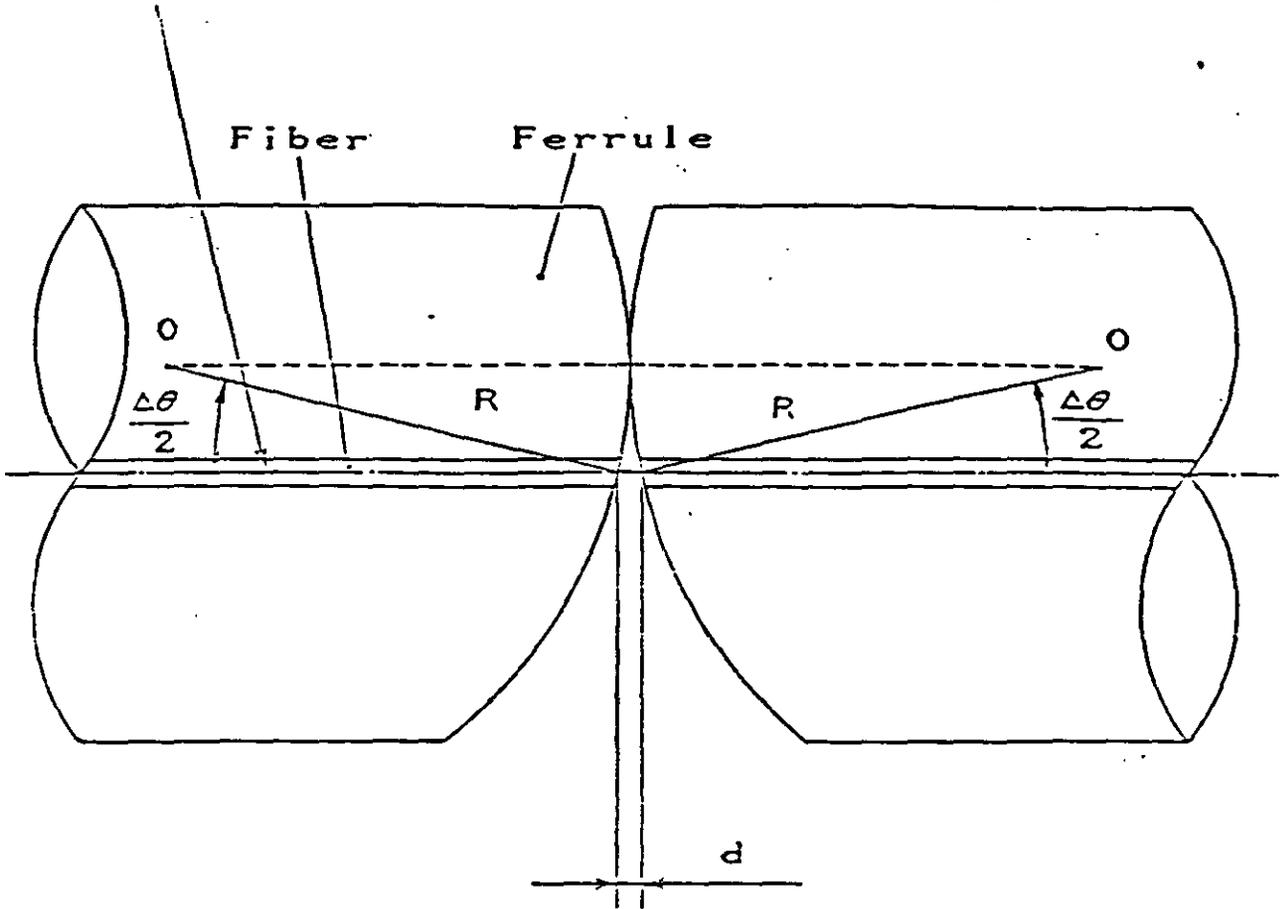
CONVEXO



PC

PLANO

Center axis of ferrule outer dia.



point O: Center of convex curved surface

$R = 60\text{mm}$

$\Delta\theta$	$d$
$0.15^{\text{deg}}$	$0.09\mu\text{m}$

The relation between  $\Delta\theta$  and  $d$

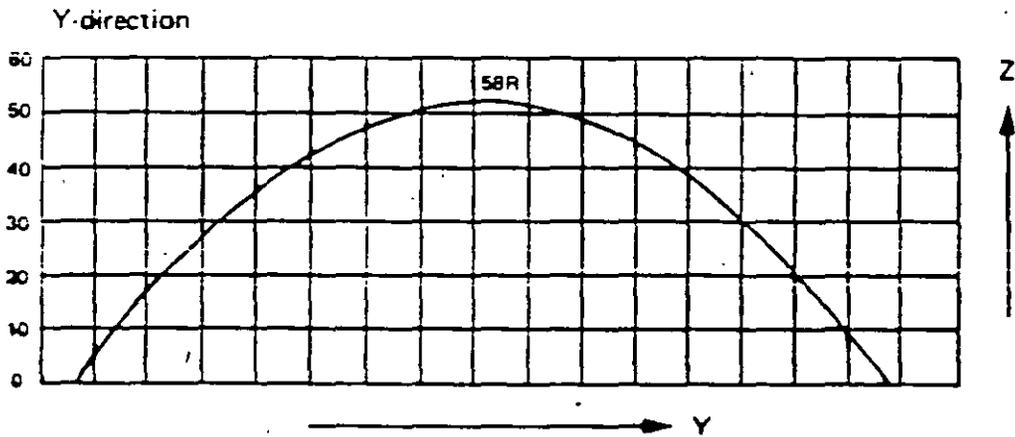
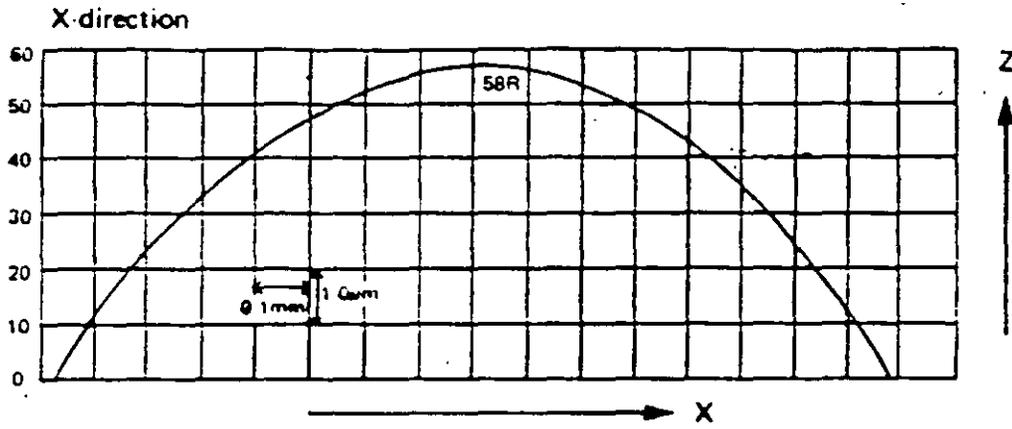
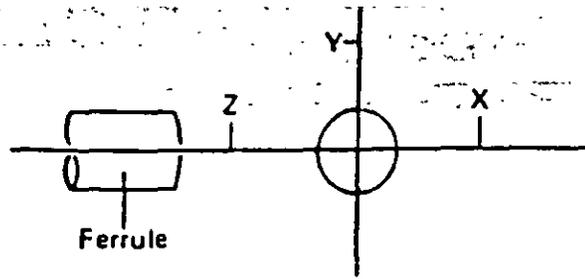
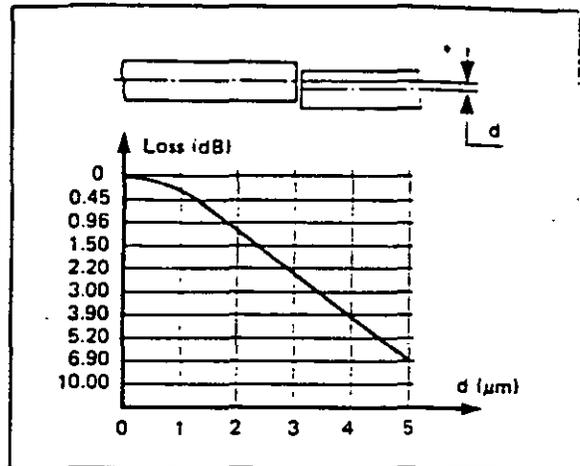


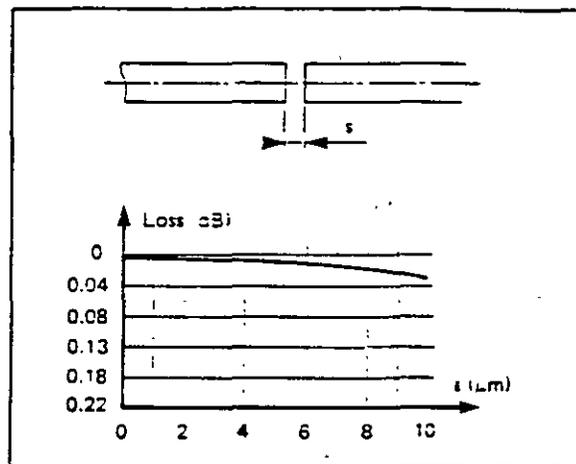
Fig. 4 The end surface shape of the convex-curved surface

**CONNECTOR RELATED LOSSES**

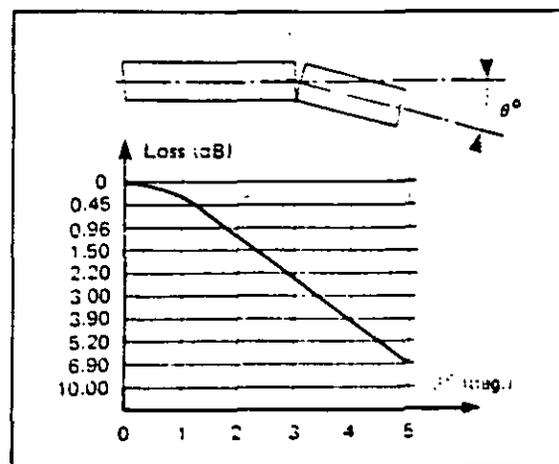
Lateral displacement causes the greatest loss in a connection.  
The **OPTABALL SYSTEM** enables the centering of the two fibers within  $1 \mu\text{m}$ .



The gap between the two fibers yields two types of losses :  
 - Fresnel loss for two glass fibers separated by air is about 0.32 dB.  
 This loss is reduced by replacing the air with index matching.  
 - Loss due to the beam expansion  
 The **OPTABALL SYSTEM** allows a distance between the two fibers of  $10 \mu\text{m}$ .

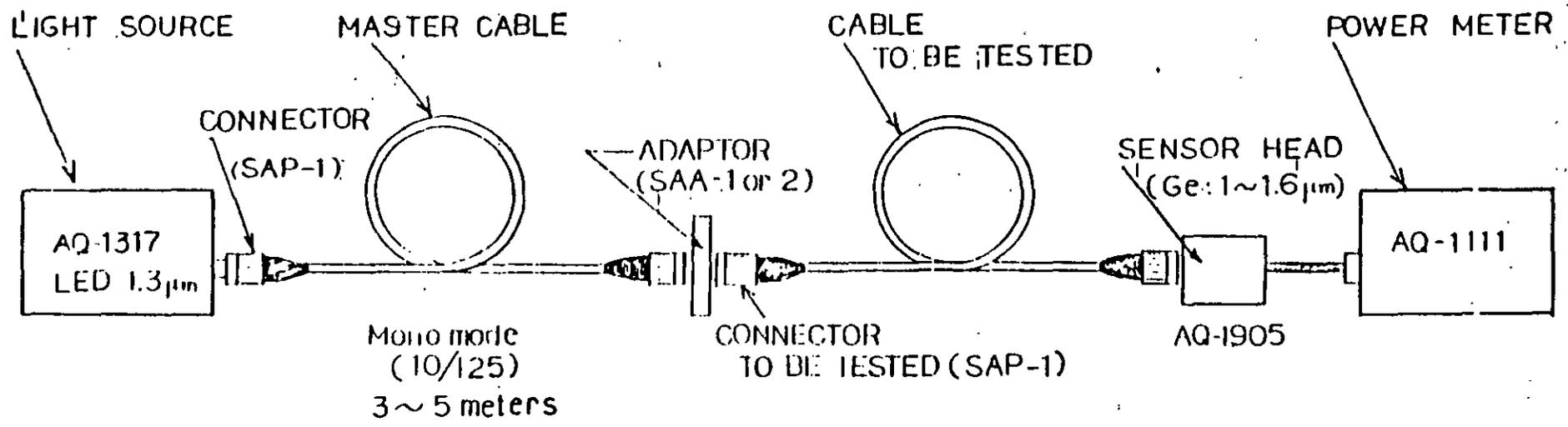


Angular misalignment also causes loss.  
The **OPTABALL SYSTEM** maintains fiber alignment within  $0.4^\circ$ .



All the tests carried out on the **RADIALL** singlemode connectors which respect the characteristics shown above give an average loss  $\approx 0.4 \text{ dB}$ .

MONO MODE CONNECTOR ATTENUATION MEASUREMENT



MANUFACTURER:

(ANDO Electric)

(Fujikura Cable.)

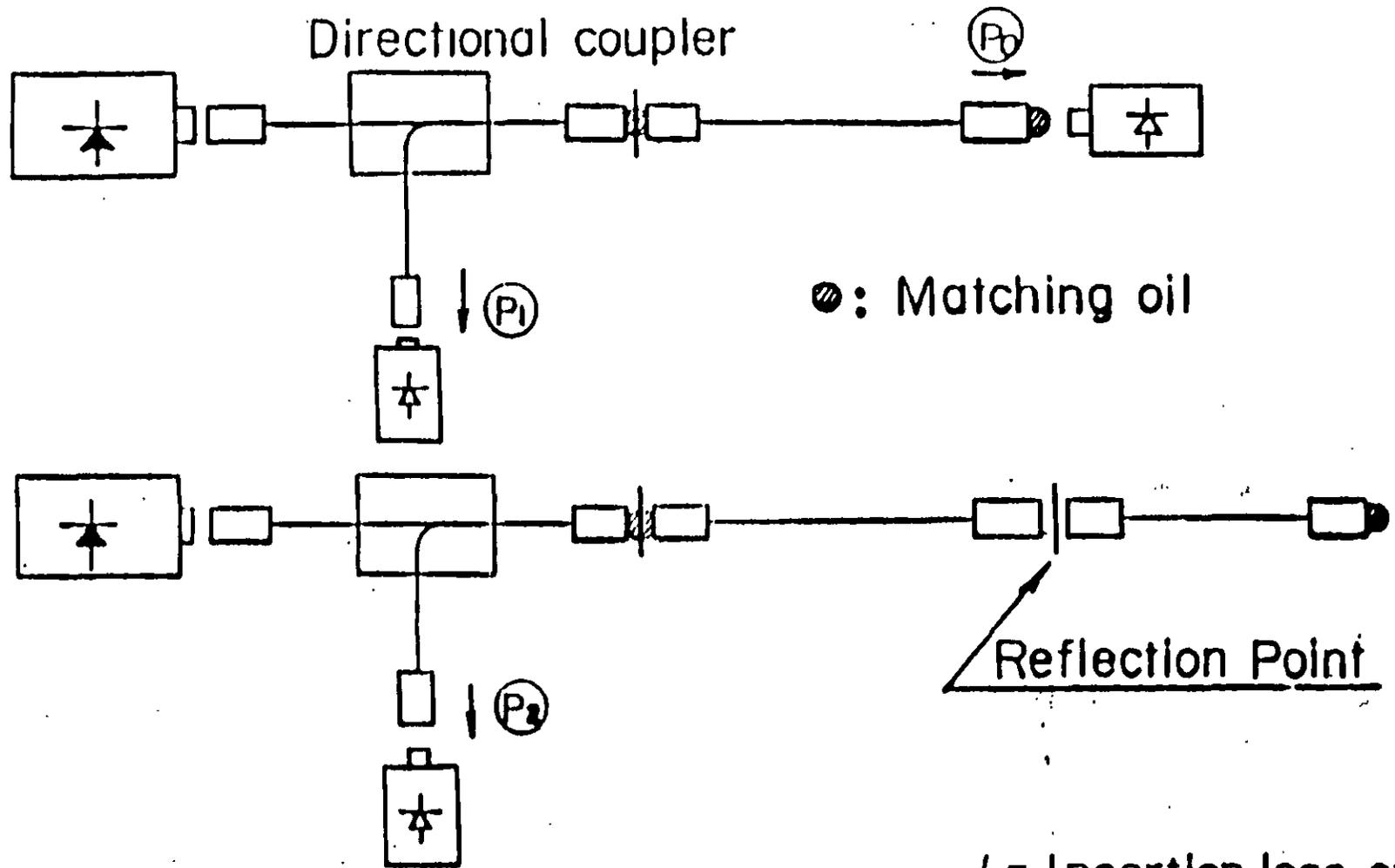
(SEIKO I&E) (Fujikura)

(ANDO)

(ANDO)

(SEIKO I&E)

# MEASURING METHOD OF RETURN LOSS



$$\text{Return loss} = -10 \log \frac{P_2 - P_1}{P_0} - \alpha \text{ (dB)}$$

$\alpha$  = Insertion loss of Directional coupler

Table 1

	Testing Items	Conditions	Fluctuation of insertion loss before and after testing	Fluctuation of return loss before and after testing
Environmental test	Temperature cycle	-40°C ~ 80°C, 10 cycle 6.5H/cycle	< 0.2 dB	> 27dB
	Heat shock	-20°C ~ 80°C, 50 cycle 1H/cycle	< 0.2 dB	
	High temperature endurance	80°C, 1000H	< 0.2 dB	
	Low temperature endurance	-40°C, 1000H	< 0.2 dB	
	High temperature and humidity endurance	40°C, 95%RH 1000H	< 0.2 dB	
Mechanical test	Durability for connection/disconnection	1000 times. The insertion loss is measured by every 100 times	< 0.2 dB	
	Vibration	X & Y Direction, each 3Hrs 10 ~ 55Hz 1.5mm, 2min/cycle	< 0.1 dB	
	Drop = SHOCK	3 times. Drop from 1m high on the oak board	< 0.1 dB	
	Bump	4000 times. Drop from 1cm high	< 0.1 dB	
	Twist = TORSION	200 times. ±360°, Tension 500g	< 0.1 dB	
	Bending	200 times. ±90°, Tension 500g	< 0.1 dB	
	Tensile strength	0 ~ 20kg. Speed of tensile strength	< 0.1 dB	

PC

#### 4.14 Temperature cycling

##### i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is set in the following conditions (Fig.21) and the fluctuation of return light is checked during the test.

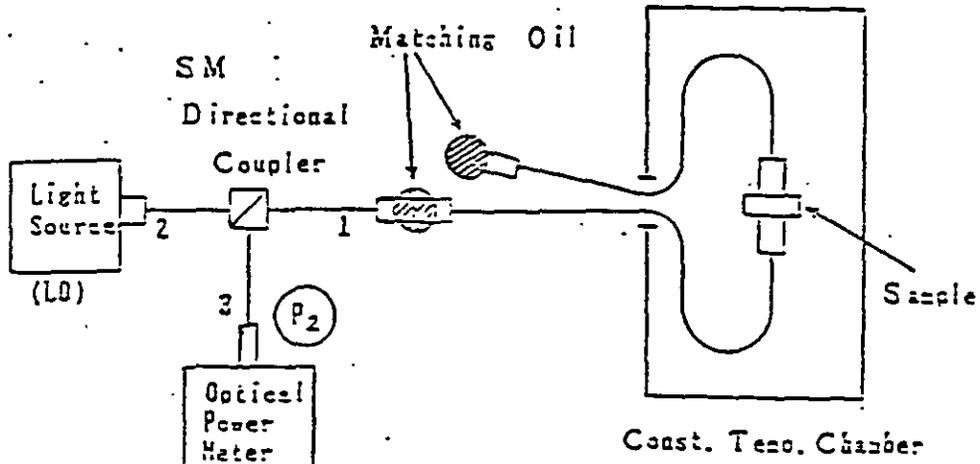


Fig. 21

##### ii) Results of assessment

Fig.22 shows measured example.

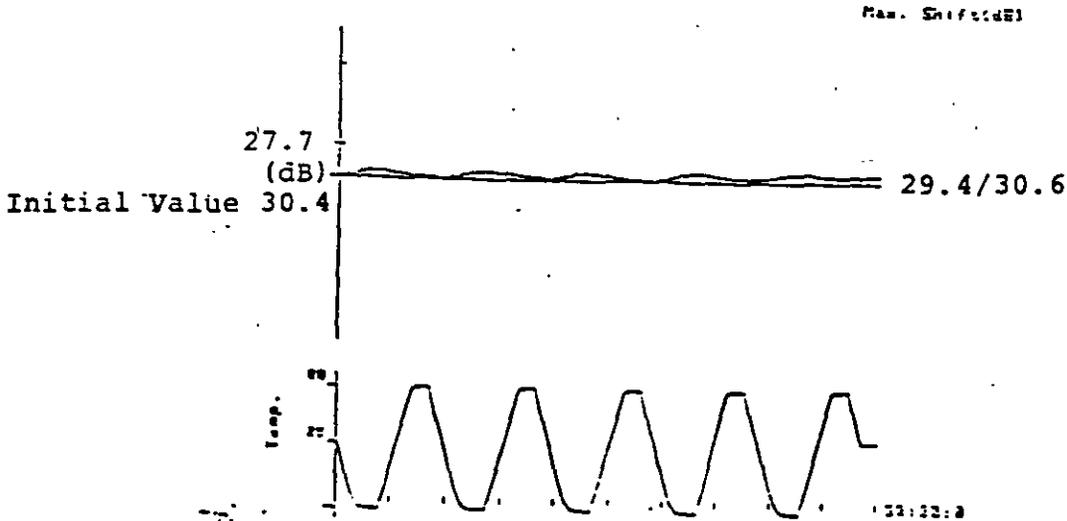


Fig. 22

4.13 Heat shock

## i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is tested 30 cycles of heat shock in the following conditions with temperature pattern as shown in Fig.20 and insertion loss and return loss are measured before and after test.

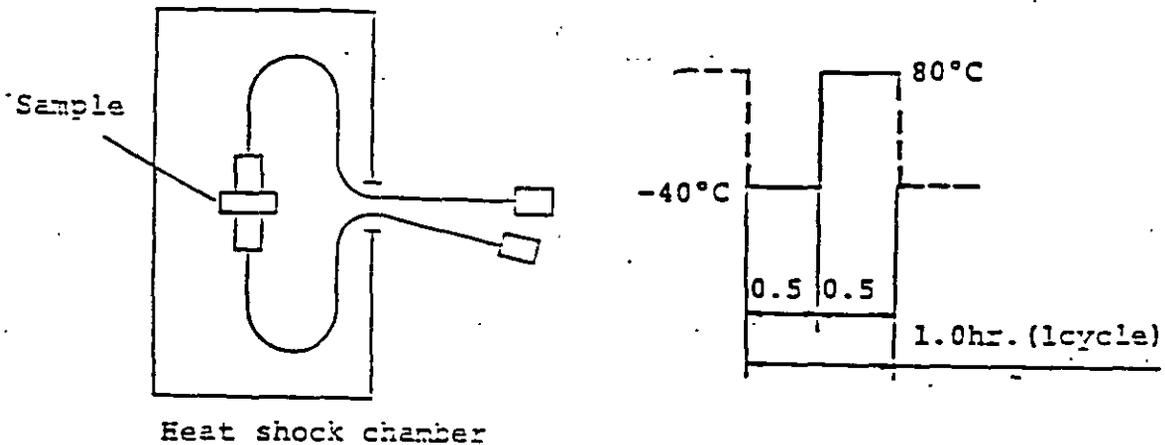


Fig. 20

## ii) Results of assessment

Table 9 shows measured example. These data meet with the specifications.

Table 9

Sample No.	Before		After		Fluctuation	
	Insertion loss	Return loss	Insertion loss	Return loss	Insertion loss	Return loss
1	0.29	31	0.22	31	-0.07	0
2	0.14	30	0.19	30	+0.05	0
3	0.23	30	0.29	30	+0.06	0
4	0.12	31	0.15	31	+0.04	0
5	0.11	30	0.26	31	+0.15	+1

Unit : dB

DC

4.10 High temperature endurance

i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is set up at 80°C in the following condition (Fig.16) and insertion loss is checked after storing for 96, 240, 500, 1,000 hrs. Return loss is measured before and after test.

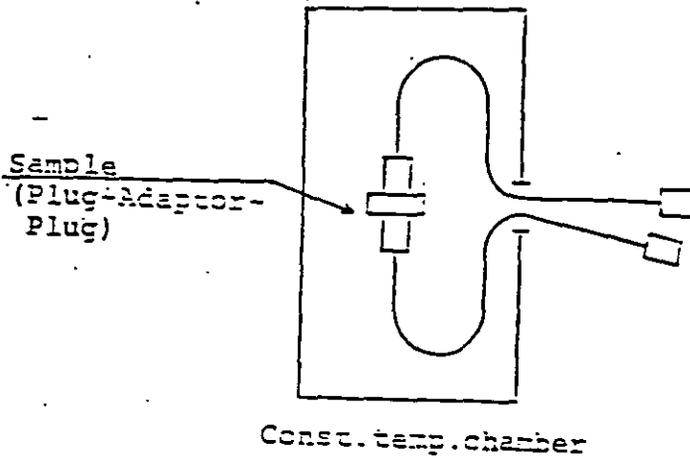
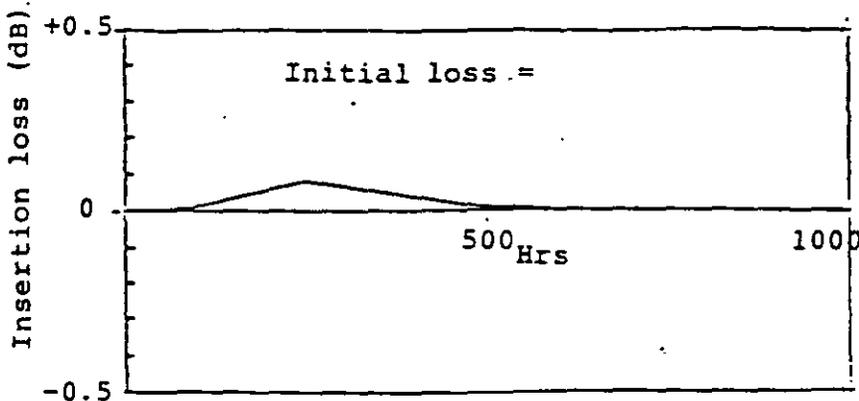


Fig. 16

ii) Results of assessment

Fig.17 a - c show measured example. These data meet with the specifications.

Sample No. 1

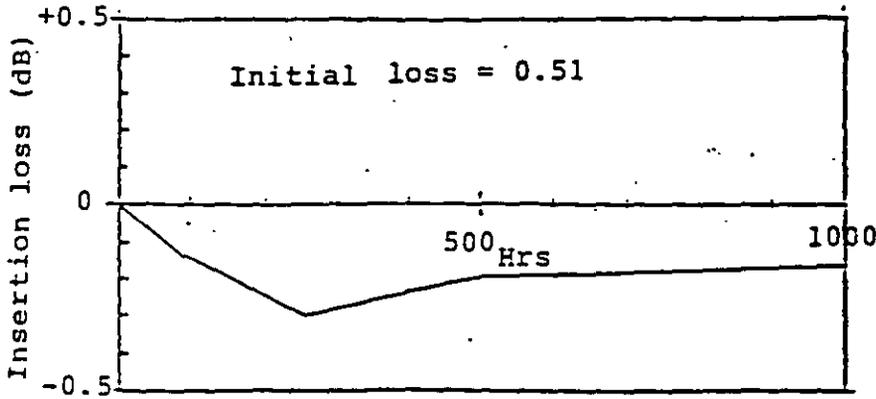


Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
29	31	+2

Fig. 17 - a

High Temp. (CONT.)

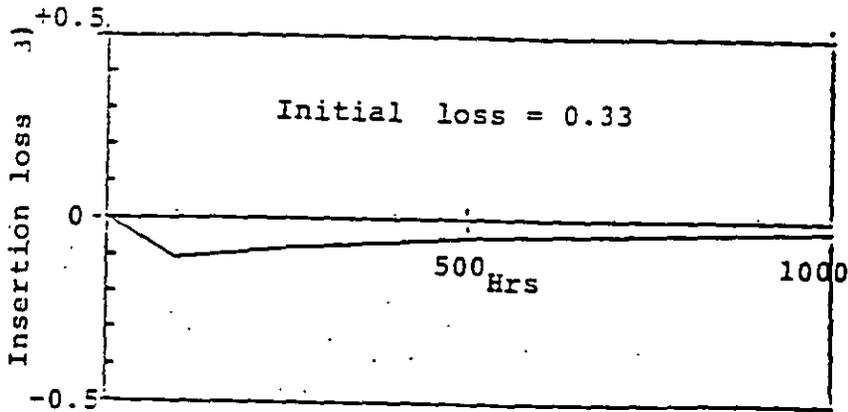
Sample No. 2



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	31	+1

Fig. 17 - b

Sample No. 3



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
31	31	0

Fig. 17 - c

PC

4.11 Low temperature endurance

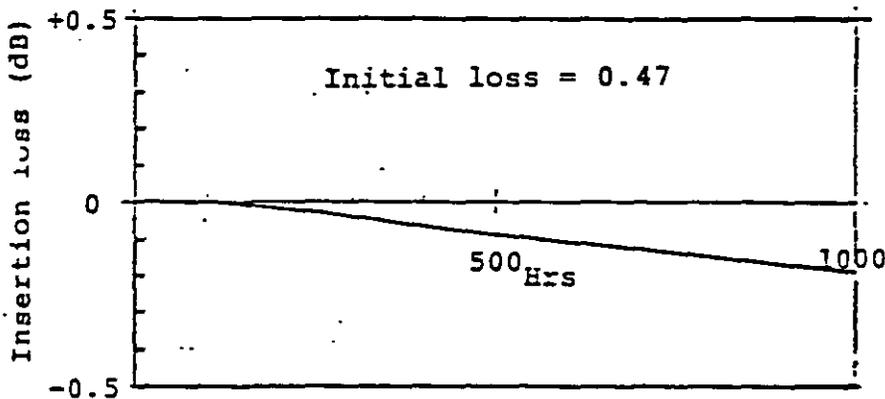
## i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is set at  $-40^{\circ}\text{C}$  in the conditions as shown in Fig.16 and insertion loss is checked after storing for 96, 240, 500, 1,000 hrs. Return loss is measured before and after test.

## ii) Results of assessment

Fig.18 a - c show measured example. These data meet with the specifications.

Sample No. 1



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	31	+1

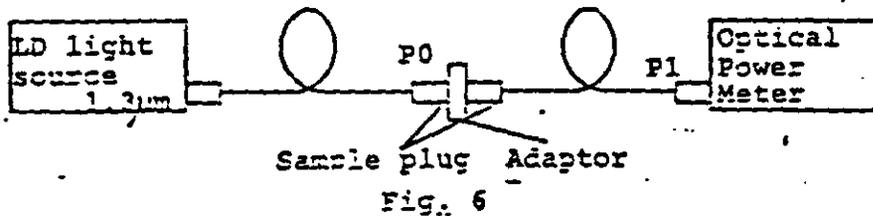
Fig. 18 - a

#### 4.3 Repeatability of connection/disconnection

##### i) Testing conditions

Used the following measuring system as shown in Fig.6, both-end-plugs are connected/disconnected 100 times and the insertion loss is measured every times.

In succession one-end-plug is connected/disconnected 1,000 times and the insertion loss is measured 10 times in total every 100 times.



##### ii) Results of assessment

Fig. 7 a - f show measured examples. These data meet with the specifications.

Sample No. 1

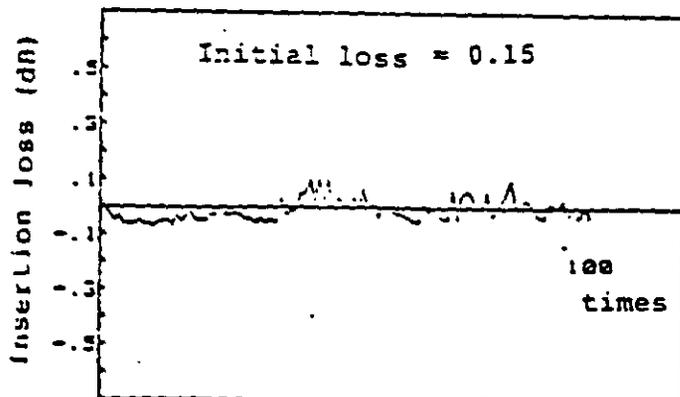


Fig. 7 - a

LOW TEMP. (CONT.)

Sample No. 2

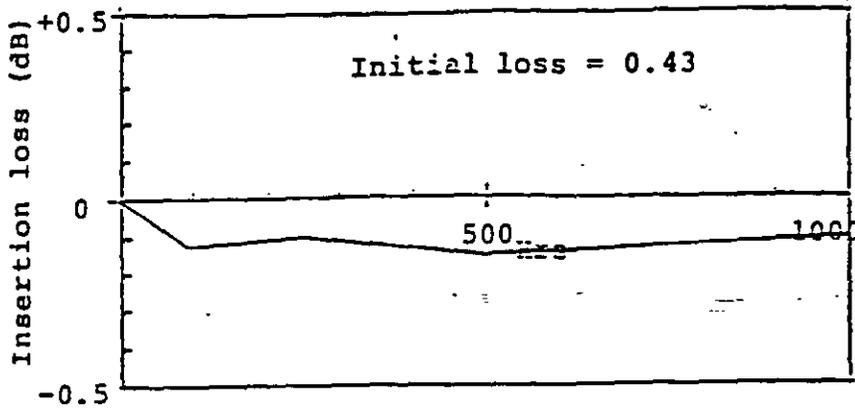


Fig. 18 - b

Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
28	30	+2

Sample No. 3

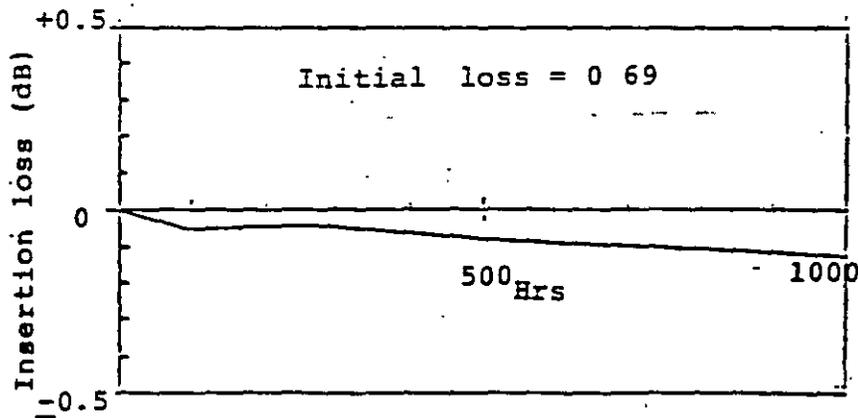


Fig. 18 - c

Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
31	31	0

PC

4.12 Dump heat, steady state + humidity

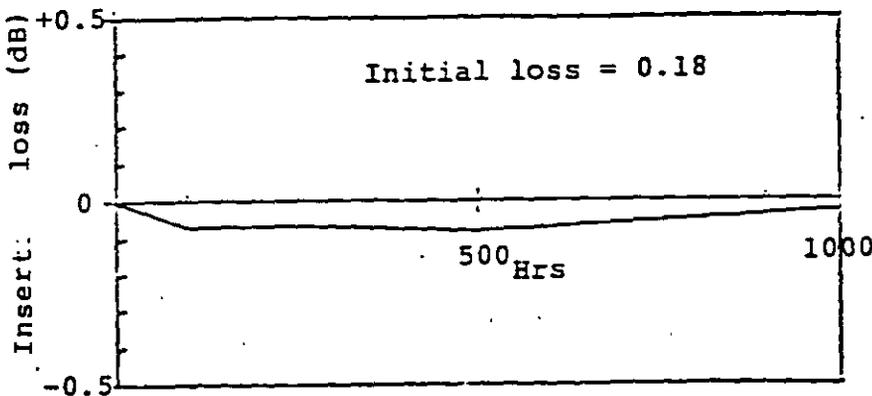
i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is set up at 40°C 95%RH in the conditions as shown in Fig.16 and insertion loss is checked after storing for 96, 240, 500, 1,000 hrs. Return loss is measured before and after test.

ii) Results of assessment

Fig.19-a - c show measured example. These data meet with the specifications.

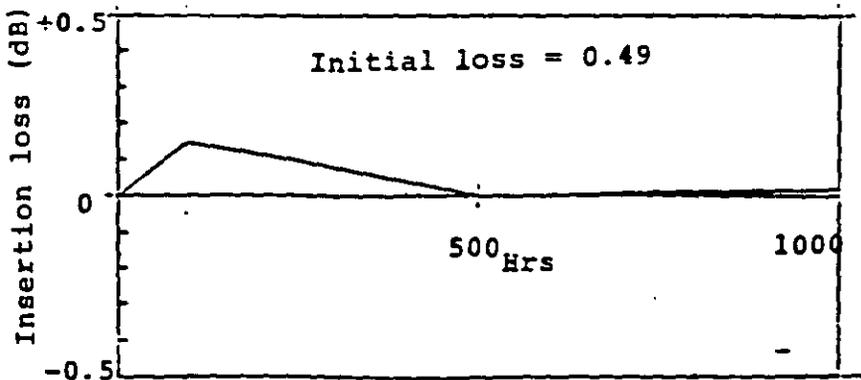
Sample No. 1



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
29	30	+1

Fig. 19 - a

Sample No. 2



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
23	31	+3

Fig. 19 - b

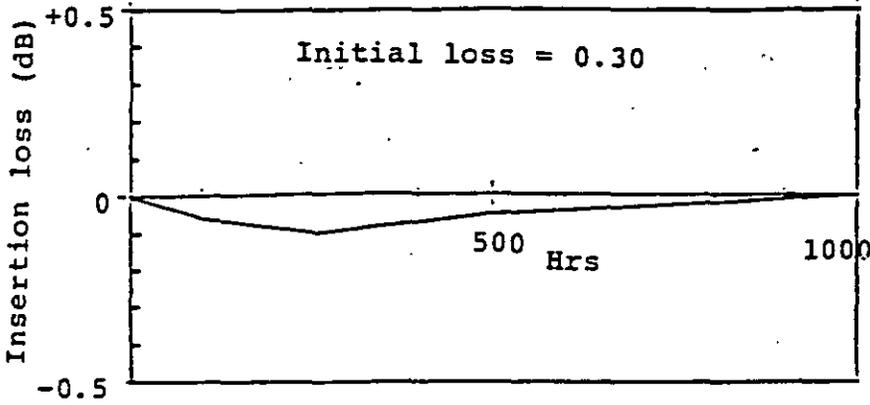
Date: May 6, 1996

No. : NAG5CD03

PC

# Humidity + Heat. (CONT.)

Sample No. 3



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	32	+2

Fig. 19 - c

Repeatability (cont.)

Date: May 6, 1986

No. : NAG5CD03

PC

Sample No.1

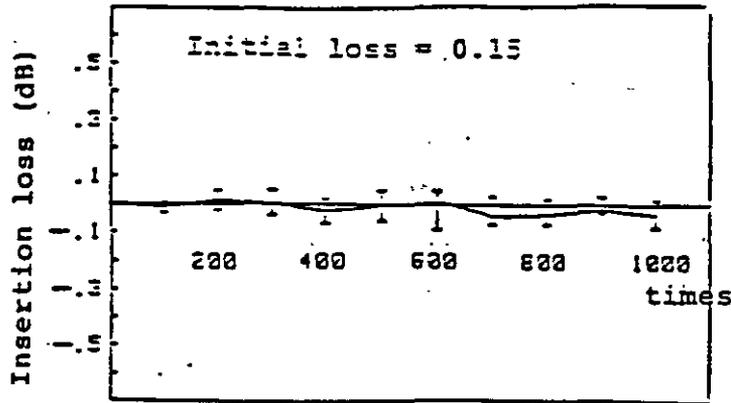


Fig. 7 - b

MAX value in 10 times  
Mean  
MIN

Sample No.2

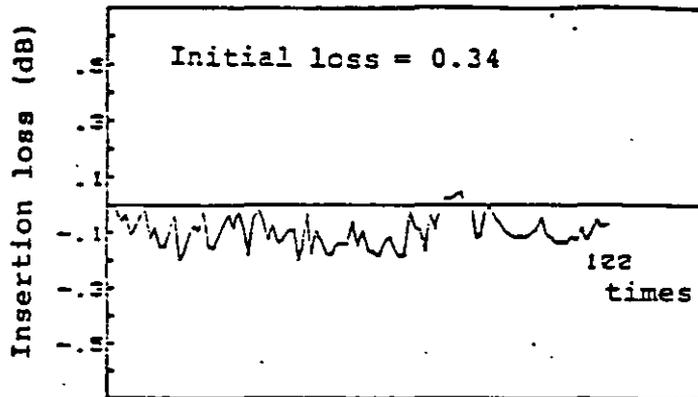


Fig. 7 - c

Sample No.2

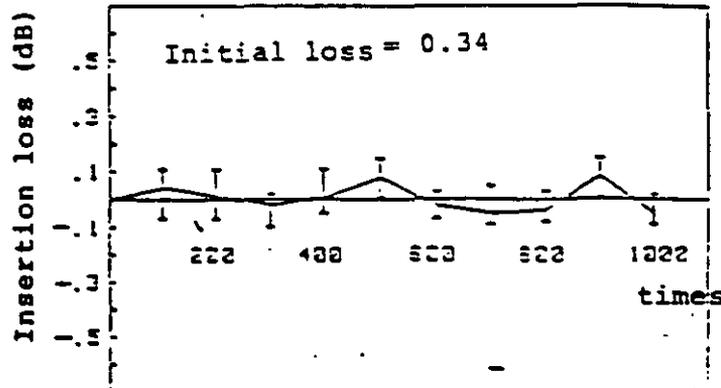


Fig. 7 - d

PC

4.4 Bump

i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is bumped 4,000 times in the following condition. (Fig.8) Insertion loss is checked every 1,000 times and Return loss in the measuring system as shown in Fig.4 (used sample plug instead of master plug) is measured before and after test.

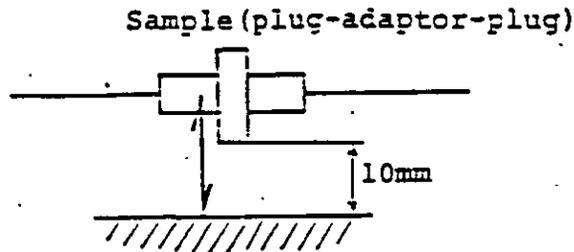
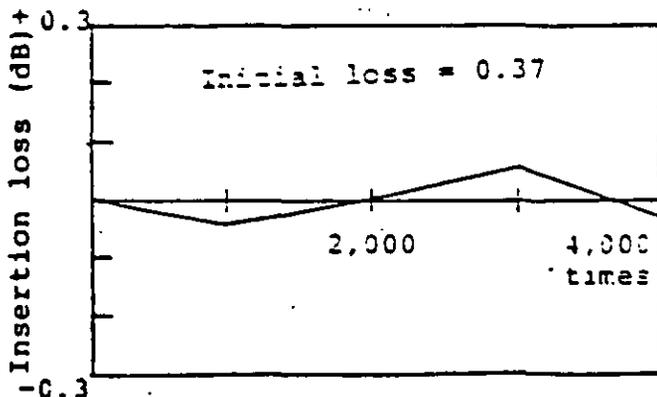


Fig. 8

ii) Results of assessment

Fig.9 a - e show measured example. These data meet with the specifications.

Sample No. 1



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	30	0

Fig. 9 - a

4.5 Shock

## i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is dropped 3 times in the following condition (Fig.10) and fluctuation of transmission light is checked every times. Return loss is measured before and after test.

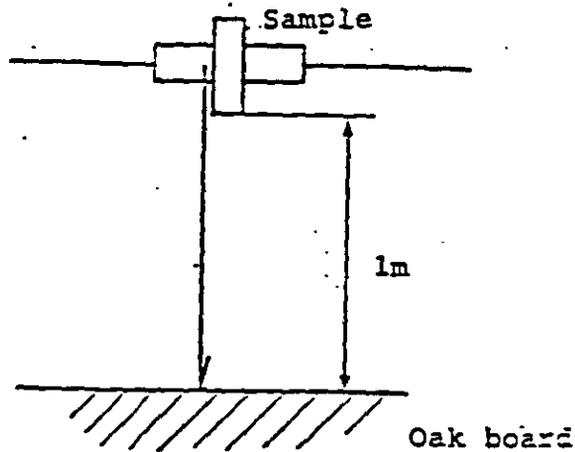


Fig. 10

## ii) Results of assessment

Table 1 shows measured examples. These data meet with the specifications.

Table 1

Sample No.	Fluctuation of transmission light			Return loss		Fluctuation
	1	2	3	Before	After	
1	-0.03	-0.03	-0.01	30	31	+1
2	-0.05	-0.02	-0.03	30	30	0
3	-0.07	-0.06	-0.07	31	31	0
4	-0.01	-0.01	-0.02	31	30	-1
5	-0.02	-0.02	-0.02	31	30	-1

Unit : dB

#### 4.6 Vibration

##### i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is vibrated in the following conditions (Fig.11 and Table 2) and insertion loss and return loss are checked before and after test.

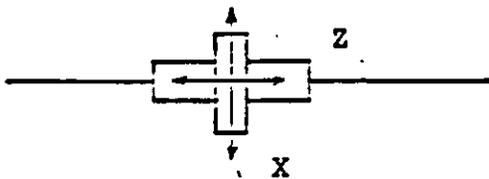


Fig. 11

Table 2

Amplitude	1.5 mm P-P
Frequency	10 to 50 Hz 2 min./cycle
Direction	X,Z each 3 hrs.

##### ii) Results of assessment

Table 3 shows measured examples. These data meet with the specifications.

Table 3

Sample No.	Before		After		Fluctuations	
	Insertion loss	Return loss	Insertion loss	Return loss	Insertion loss	Return loss
1	0.46	30	0.50	30	+0.04	0
2	0.18	30	0.17	30	-0.01	0
3	0.33	29	0.30	29	-0.03	0
4	0.25	30	0.25	31	0.00	+1
5	0.20	29	0.31	30	+0.09	+1

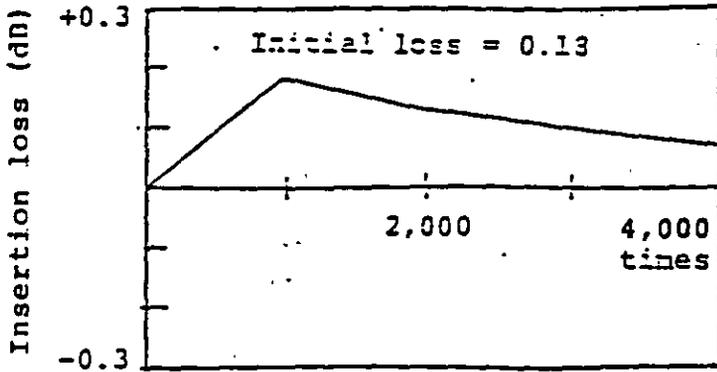
Unit : dB

# BUMP (CONT'D)

Date: May 6, 1968

No. : NAG5CD03

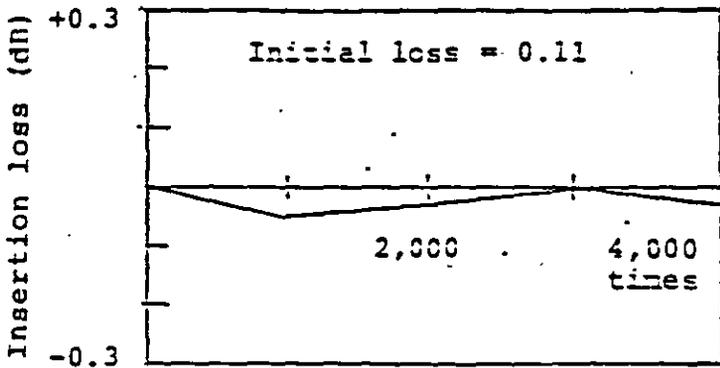
PC



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	30	0

Fig. 9 - b

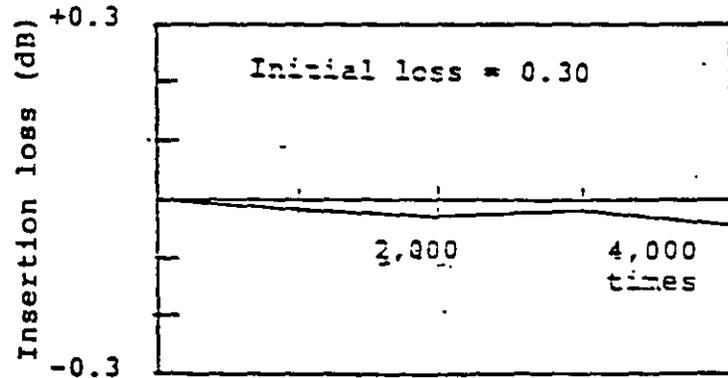
Sample No. 3



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	30	0

Fig. 9 - c

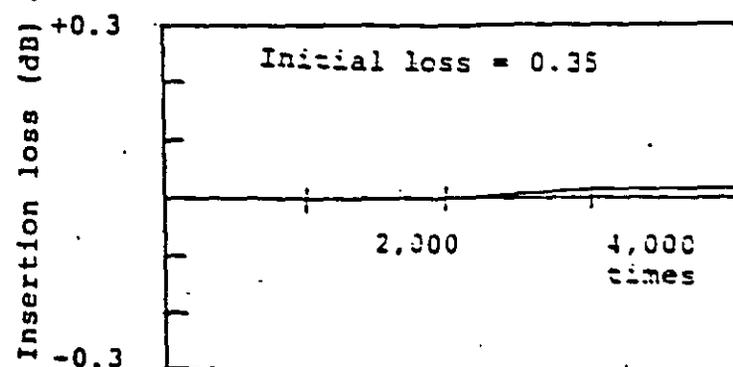
Sample No. 4



Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
31	32	+1

Fig. 9 - d

Sample No. 5

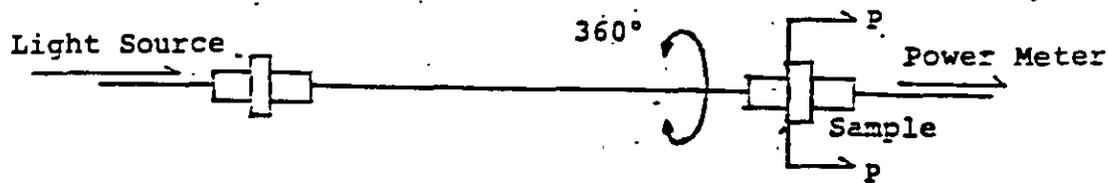


Return loss (dB)		
Before	After	Fluc.
30	31	+1

4.8 Tortion

## i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is tested in the following conditions (Fig.13 and Table 6) and fluctuation of transmission light is checked before and after test and return loss is measured before and after test.



- Fig. 13

Table 6

Tension (P)	500g
Cycling time	1 sec/cycle
Operation times	200 times

## ii) Results of assessment

Table 7 shows measured examples. These data meet with the specifications.

Table 7

Sample No.	Fluc. of trans- mission light	Return loss		
		Before	After	Fluc.
1	0.00	31	32	+1
2	0.00	30	31	+1
3	0.00	33	33	0
4	0.00	35	36	+1
5	0.00	31	31	0

PC

4.7 Bending moment

## i) Test conditions

Sample (plug-adaptor-plug) is tested in the following conditions (Fig.12 and Table 4) and fluctuation of transmission light is checked before and after test and return loss is measured before and after test.

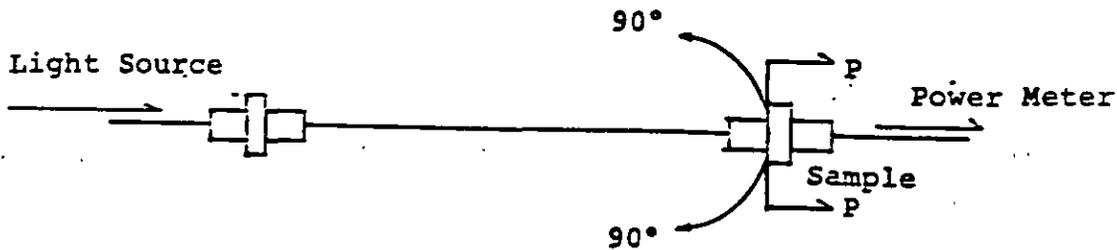


Fig. 12

Table 4

Tension (P)	500g
Cycling time	6 sec/cycle
Operation times	200 times

## ii) Results of assessment

Table 5 shows measured examples. These data meet with the specifications.

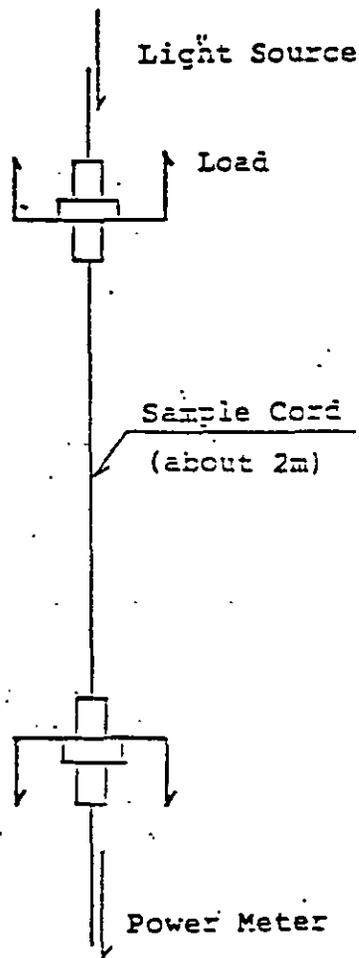
Table 5

Sample No.	Fluc. of transmission light	Return loss		
		Before	After	Fluc.
1	0.00	32	30	-2
2	0.00	31	31	0
3	0.00	33	30	-3
4	0.00	36	30	-6
5	0.00	31	30	-1

4.9 Tensile strength

i) Test conditions

Sample (jumper cable) is tested in the following conditions (Fig.14) and fluctuation of transmission light is checked during test and after test.



Tensile speed:  
0.2mm/min.

Fig. 14

## TENSILE STRENGTH (CONT.)

ii) Results of assessment

Table 8 shows measured examples. Fig.15 shows typical stress-strain curve.

Table 8

Sample No.	Fluctuation of transmission light				
	0kg	5kg	10kg	20kg	0kg
1	0	0	0	0	0
2	0	0	+0.01	+0.01	0
3	0	-0.01	-0.01	-0.01	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	-0.02	-0.05	-0.05

Unit : dB

SFIKO. I

# Single-Mode D4 Compatible Type Connector

Plug: SDP-1, Adaptor: SDA-1

## FEATURES

- Using ceramic capillary in ferrule and slit sleeve in adaptor, which are highly experienced in FC type connector, high reliability has been performed.
- With fiber excentricity adjusting function, on the spot assembly can be realized.
- Polishing (PC and flat) can be performed by our Fiber Polisher OFL-1B, 2, 6 series.

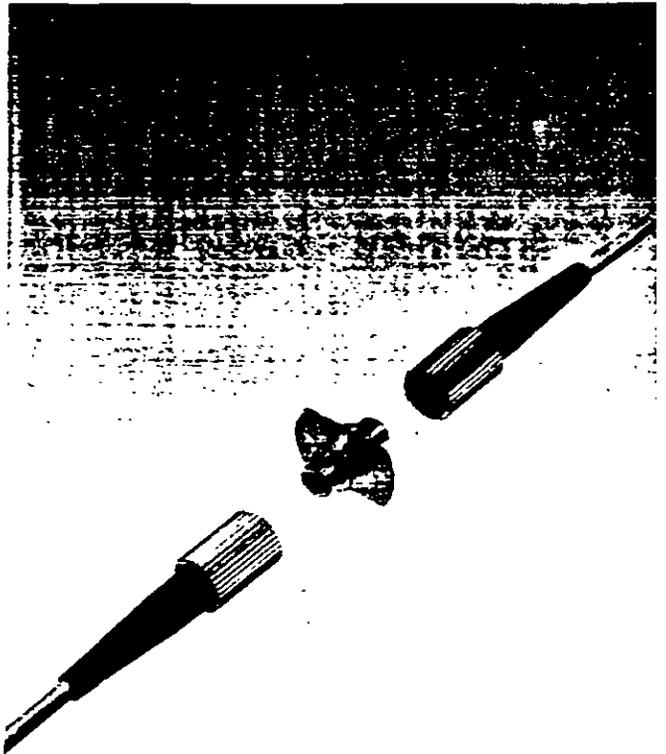
## SPECIFICATIONS

Plug	SDP-1
Applicable fiber cord	Single fiber (Fiber dia $\phi 125\mu\text{m}$ Fiber cord dia $\phi 3\text{mm}$ )
Connection loss	<1dB (SM10/125 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ Adaptor SDA-1)
Working temperature range	-40 to 80°C
Connection durability	more than 1000 times

## CHARACTERISTICS

Items	Test conditions	Performance
Connection loss	SM 10.125 fiber $\lambda=1.3\mu\text{m}$ LED Light source (RM Temp)	<1.0dB
Connection durability	more than 1000 times	<1.2dB
Vibration	10~55Hz 1.5mm P-P	<1.2dB
Tensile	10kg	<1.2dB
Temperature cycling	-40~80°C 10 cycles	<1.2dB
High temperature	80°C 240 hours	<1.2dB
Low temperature	-40°C 240 hours	<1.2dB
High humidity	40°C 95%RH 240 hours	<1.2dB

Note: Data changes according to the fiber specifications.

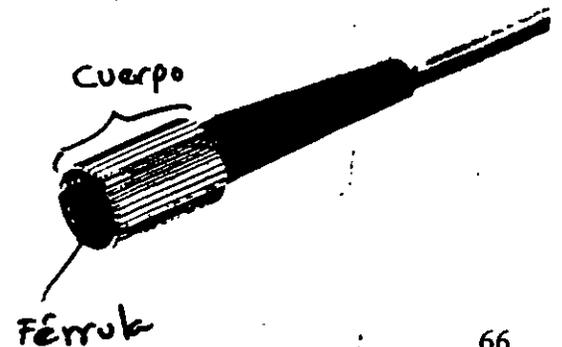
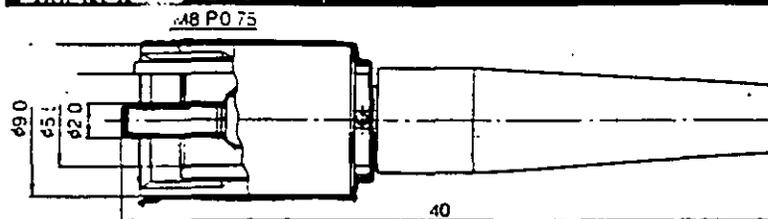


## SDP-1 D4 COMPATIBLE PLUG

### FEATURES

- Easy on the spot assembly with only 3 parts of ferrule, housing and rubber hood.
- Conform to JIS standard.

### DIMENSIONS (unit: mm)



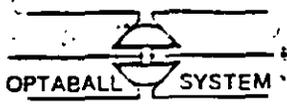
## SPECIFICATIONS MMS -3/0

<b>Available as</b>	Parts for field termination with Z - 211-kit.
<b>Fibre type</b>	9/125 micron singlemode.
<b>Alignment method</b>	High precision annular crimp centres cladding within ferrule. Ferrule rotates (12 pre-set positions) for optimum positioning. Fibres in contact. Perpendicular fibre end faces.
<b>Construction/ Materials</b>	Ferrule: Ø 3,5 mm, Tungsten carbide with spiral air vent, spring loaded with 10 N spring force. Alignment sleeve: Tungsten carbide, solid bush. External body parts: Nickel silver, PVC cable boot for bend protection. Connection with threaded nut (M 9 x 0,5 mm).
<b>Versions available</b>	- Standard: for secondary coated fibres (tight buffered or loose tube).
<b>Compatibility</b>	With all DIAMOND connectors Ø 3,5 mm (singlemode).

### Technical data:

<b><u>Insertion loss</u></b>	<u>1 dB typical</u> (9/125 SM, 1300 nm, room temperature, dry)
<b><u>Repeatability</u></b>	<u>± 0,5 dB</u>
<b><u>Service life</u></b>	min. 1000 matings without change of insertion loss
<b><u>Return loss</u></b>	<u>12 dB typical</u>
<b><u>Operating temperature</u></b>	- 20° / + 80° C
<b><u>Storage temperature</u></b>	- 40° / + 90° C
<b><u>Strain relief</u></b>	200 N (light interruption at 10 N)

Technical data is subject to change without notice

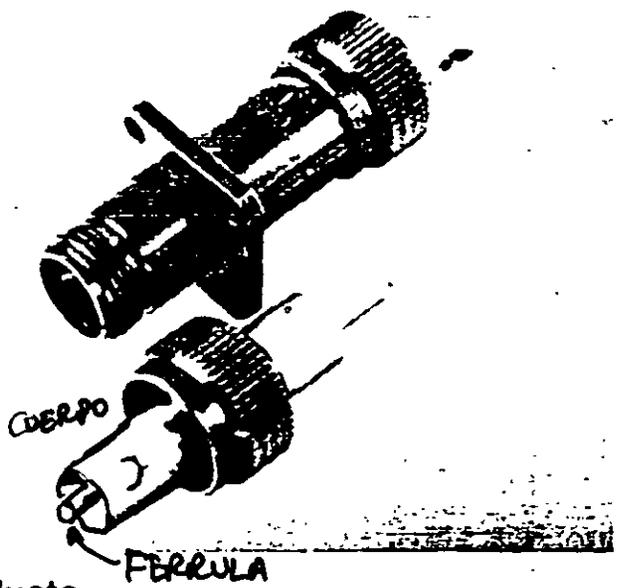


# HIGH PERFORMANCE SINGLEMODE CONNECTOR

**VFO series**  
with index matching gel

## RADIALL OPTABALL system and singlemode fiber

A high performance series intended for singlemode fiber transmission systems and all applications requiring low insertion loss and high bit rates.

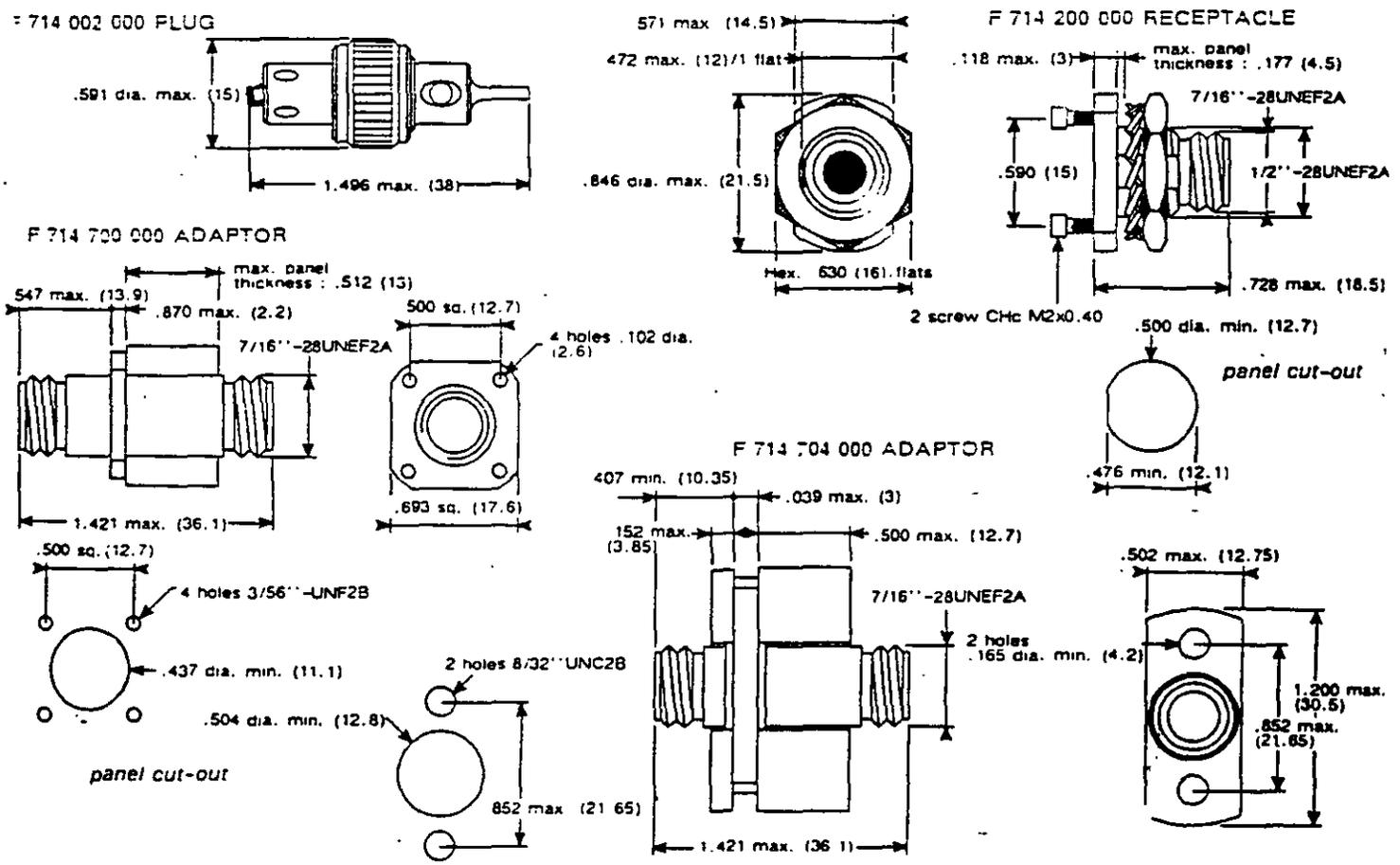


### Characteristics

- optical :  
 Typical insertion loss :  $\leq 0.3$  dB.  
 Typical reflected power :  $\leq -35$  dB.  
 (with OPPANOL-B3 index matching gel).
- mechanical :  
 Mating life : 250 operations.  
 Vibrations : 10-55 Hz 1.5 mm peak to peak.
- environmental :  
 Temperature range :  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+60^{\circ}\text{C}$ .  
 Damp heat : 95 % HR 4 days.
- material :  
 Stainless steel.  
 Black chrome-plated alloy.

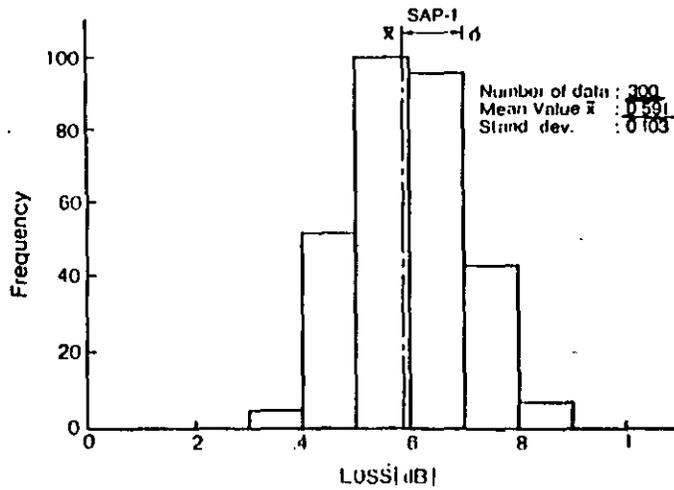
### Products

Crimp straight plugs - Adaptors - Receptacles - Rack and panel connectors - Patchcords and Pigtails - mounting tool.

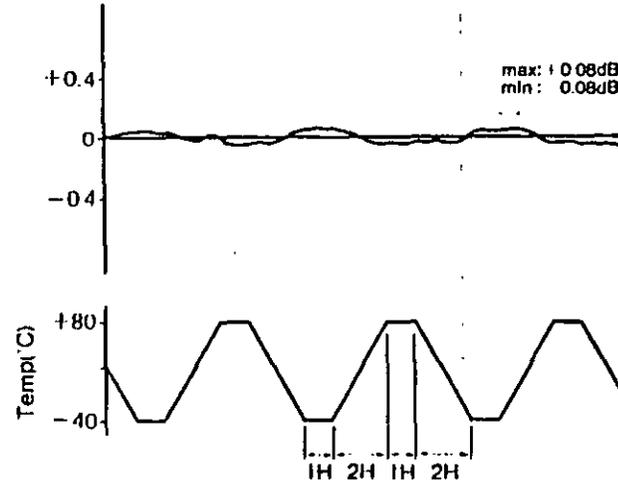


# DATA

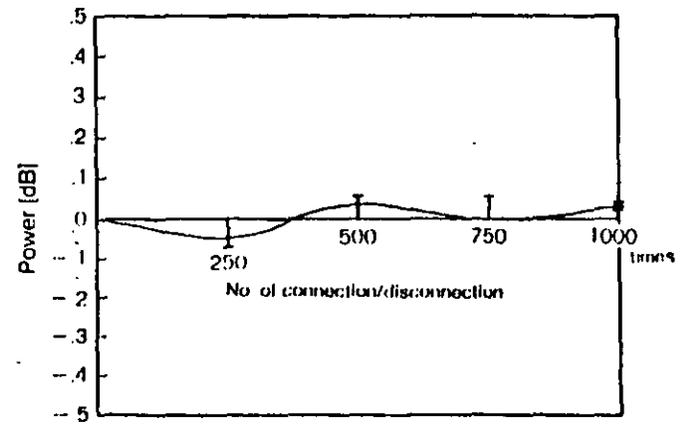
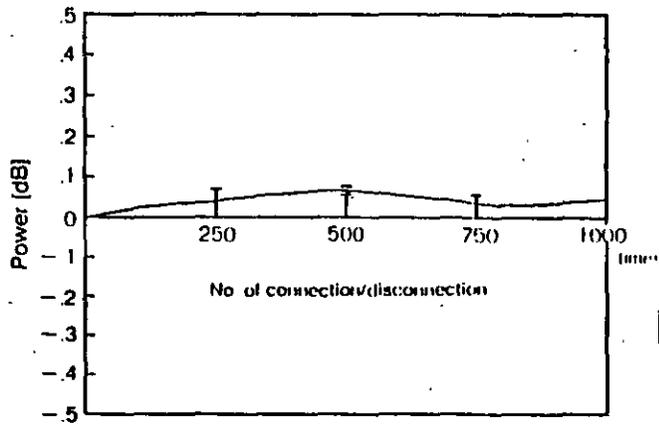
## Connection Loss



## Optical Power Fluctuations in Temperature Cycle



## Durability



\*Specifications are subject to change without notice.

# ORDER INFORMATION



A. REPEATABILITY: Through 100 times of connection/disconnection insertion loss is measured.

FLUCTUATION + : LOSS DECREASE

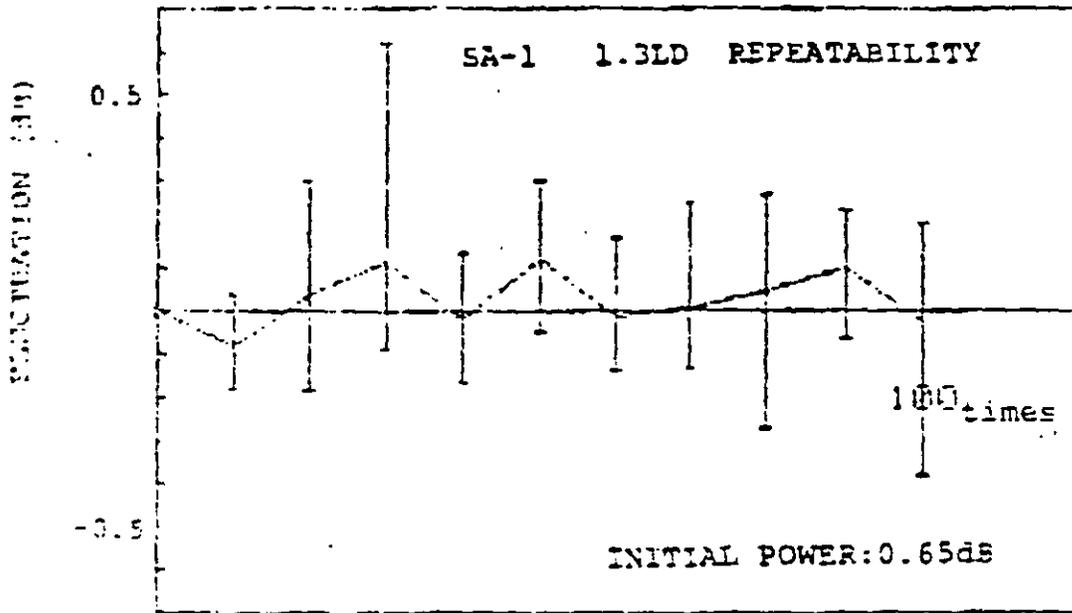


Fig.3

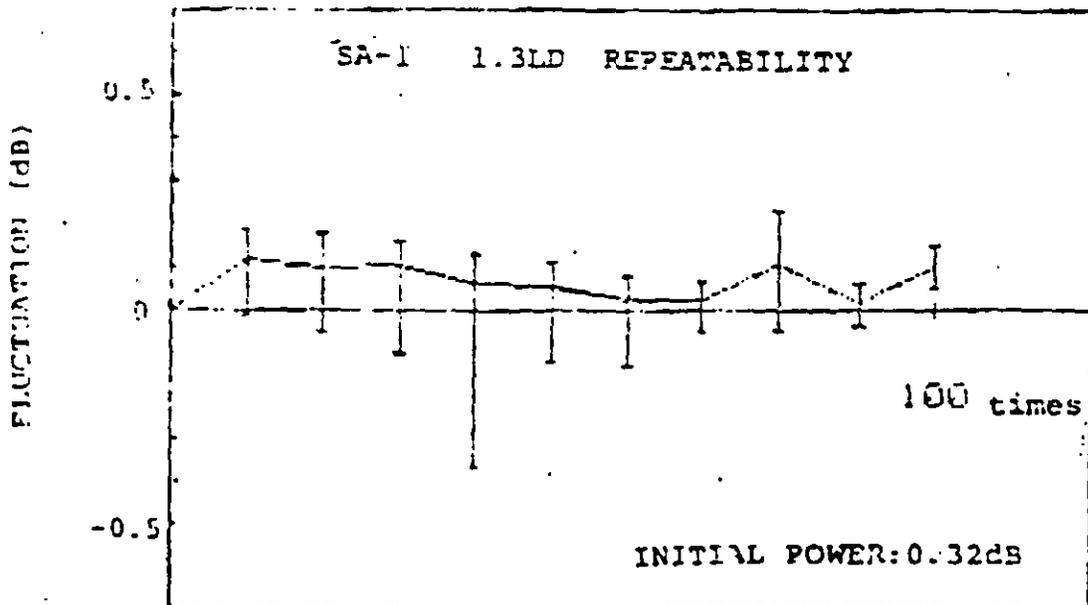
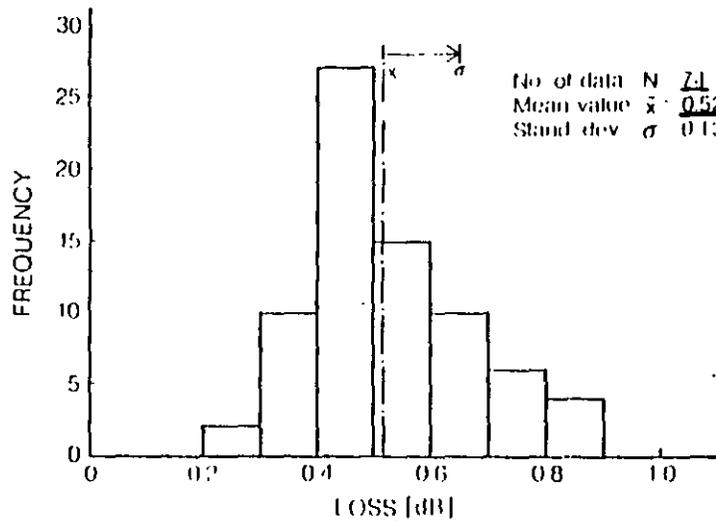


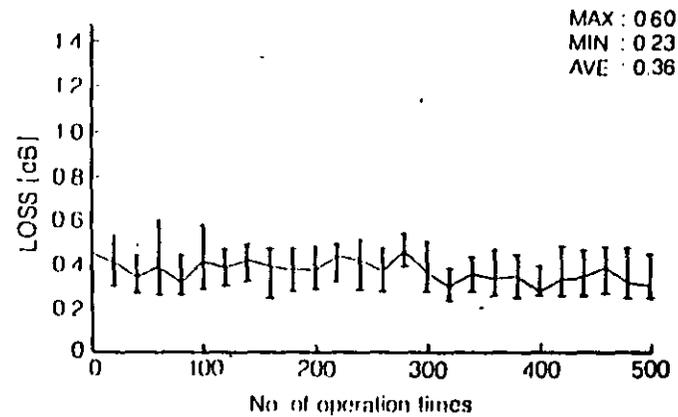
Fig.4

**DATA**

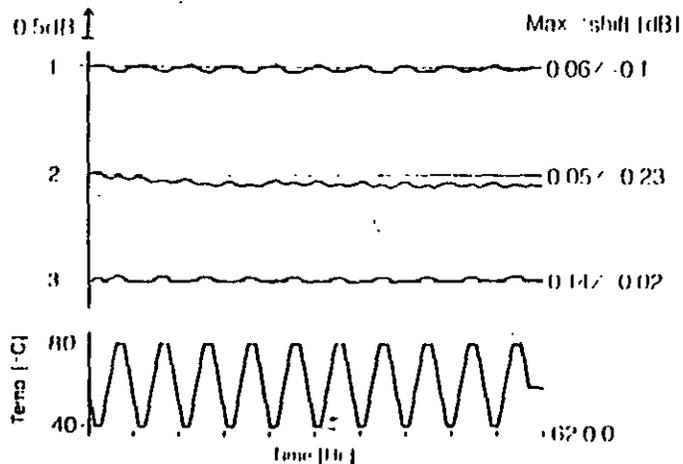
**CONNECTION LOSS**



**DURABILITY**



**OPTICAL POWER FLUCTUATIONS IN TEMPERATURE CYCLE**



**ORDER INFORMATION**

(mean loss ...)

III - MATING/UNMATING REPEATABILITY.

RADIAL

Four connectors had been tested. The total deviations  $(\Delta\alpha) = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  were found less than 0.10 dB for

100 mating/unmating cycles of both plugs.

Each plug of a connector was undergone 10 cycles and then the loss was noted. In total 20 measurements for 1 connector.

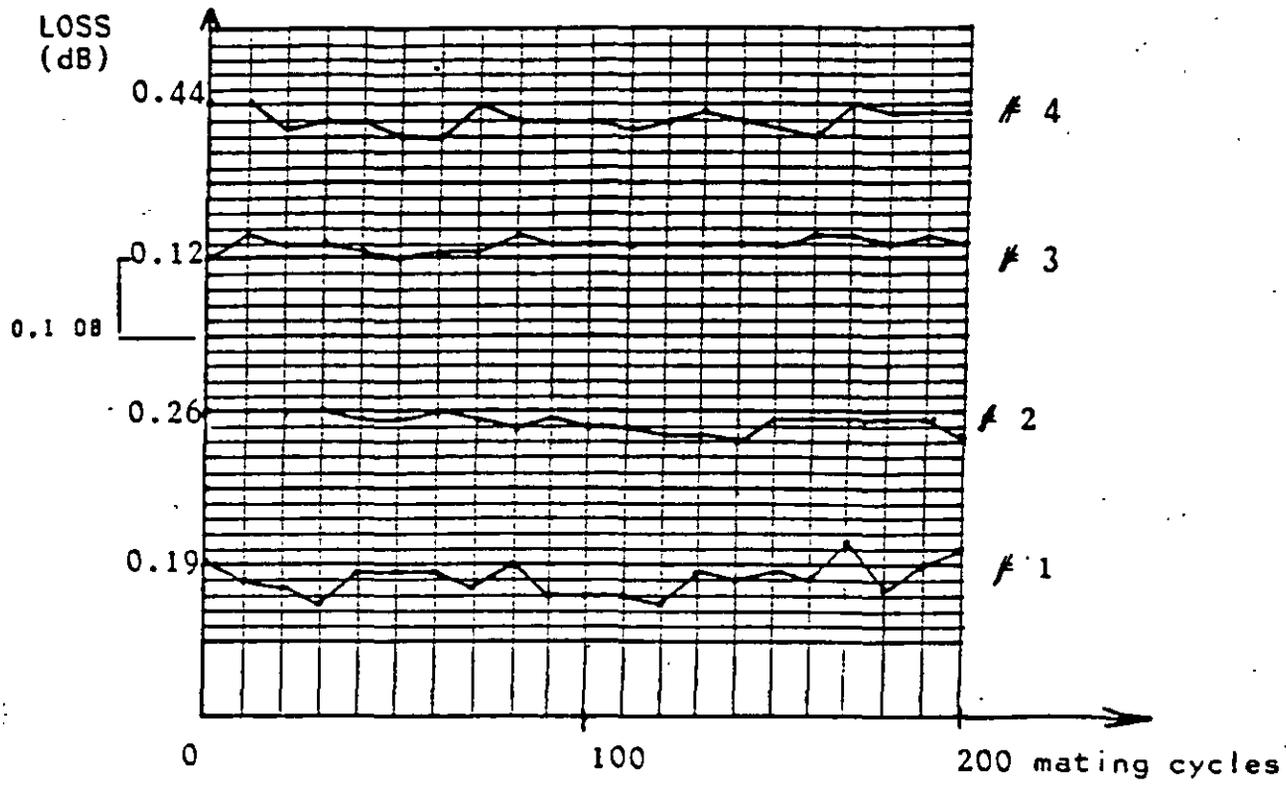
TABLE 2 - REPEATABILITY

Connector	$\alpha$ (initial loss)	$(\Delta\alpha)_{\max}$
# 1	0.19	0.08
# 2	0.26	0.04
# 3	0.12	0.03
# 4	0.44	0.04

# REPEATABILITY (CONT.)

ZADIALL

Figure 2 show these results :



C O N E C T O R E S   P A R A   F I D R A   O P T I C A .

U N I M O D O				
TIPO	FC	D4	RADIAL	DIAMOND
PRECIO	10 USD	14 USD	100 USD	120 USD
ATENUACION	0.5 dB	< 1 dB	0.4 dB	0.3 dB
REPETIBILIDAD	1,000	1,000	200 +/- .1dB	1,000 +/- .2 dB
PERDIDAS DE RETORNO	30 dB	--	30 dB	12 dB
No. DE PZS.P/ENSAMBLE	11	7	4	17

M U L T I M O D O				
TIPO	SMA	SC	ST	MINI BNC
PRECIO	8 USD	12 USD	7 USD	9 USD
ATENUACION	< 1 dB	< 0.5 dB	< 0.8 dB	< 1.0 dB
REPETIBILIDAD	500 +/- .2 dB	-----	1,000 +/- .2 dB	1,000 / .2 dB
No. DE PZS.P/ENSAMBLE	5	9	5	5



B. TEMPERATURE CYCLE: Through 2 cycles of temperature from -20°C to 80°C, insertion loss is measured.

The difference of loss fluctuation due to light source (LD & LED) is shown in Fig. 5 a & b and Fig. 6 a & b

FLUCTUATIONS of OPTICAL POWER  
(1.3 LD Source)

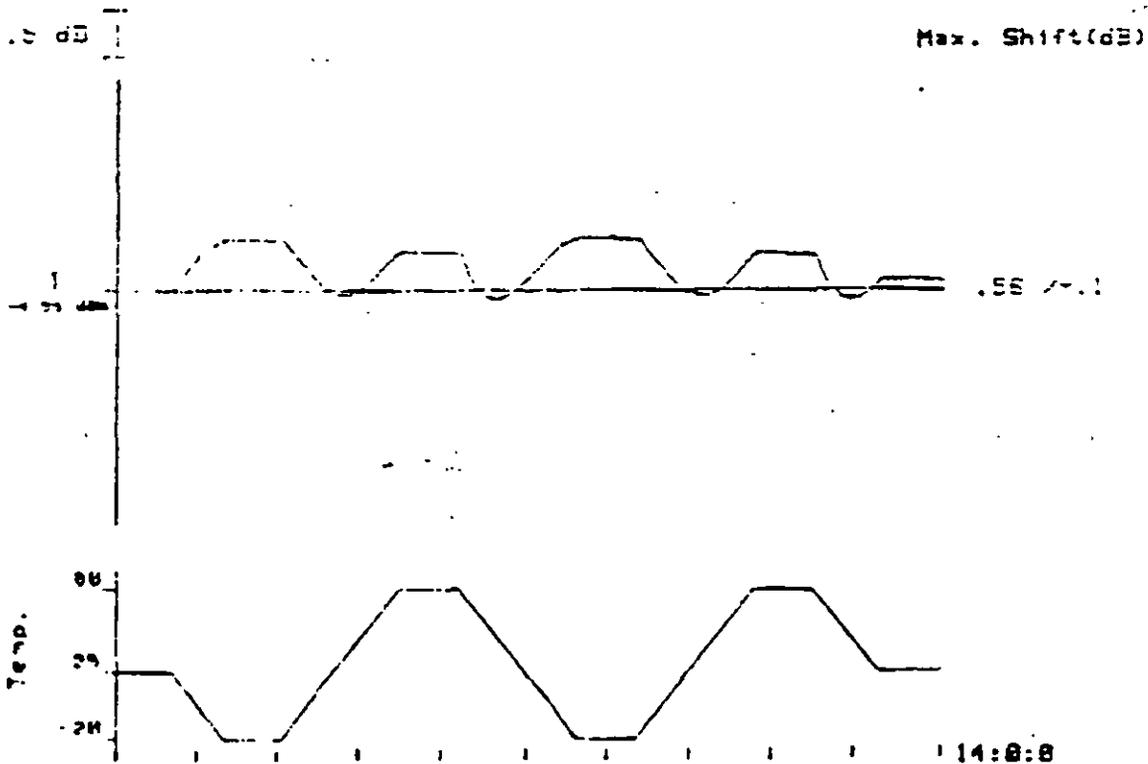


Fig.5-a



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

**CONFERENCISTA  
DR. FRANCISCO J. MENDIETA JIMÉNEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

**TENDENCIAS DE INVESTIGACION Y DESARROLLO**

La figura presenta la evolución de la telefonía tradicional hacia los servicios de la "era de la información". El creciente ancho de banda ilustrado en abscisas refleja el incremento en la velocidad de los dispositivos electrónicos y ópticos, impulsados particularmente por el nuevo medio de transmisión; la fibra óptica. Con una capacidad creciendo aceleradamente tanto en transmisión como en conmutación, la red es capaz de manejar comunicación "multimedia". Además de la voz tradicional, puede proporcionar servicios de datos, facsímil, video, etc. Este eje representa la tecnología tradicional de las telecomunicaciones.

La ordenada describe el nivel creciente en la inteligencia de la red. Esta es una nueva dimensión en las telecomunicaciones modernas, dado que hasta ahora había sido terreno de la computación, partir del desarrollo conjunto del "software" y del "hardware", ayudado por el incremento de velocidad y complejidad de los circuitos y computadoras digitales.

Los avances en este campo están marcados por los procesadores de señal de alta velocidad, microprocesadores de creciente complejidad, capacidades mayores y tiempos de acceso menores en el almacenamiento y nuevos avances en "software" tales como los asociados a inteligencia artificial y redes neuronales. La inteligencia impacta tanto en la operación interna de la (inteligencia) red como en los servicios ofrecidos. Las características más avanzadas vendrán de la sinergia del ancho de banda y la inteligencia.

Se prevé que la red proporcionará un número creciente de servicios sobre interfaces "amigables". Se podrá responder a comandos de voz y el sistema podrá identificar a los usuarios a partir de patrones de voz. Después, la red será capaz de detectar las necesidades de los clientes. Por ejemplo, podrá grabar y categorizar los hábitos de los usuarios y ofrecer servicios, paquetes de información orientados y/o entretenimiento. Esta base de datos de usuarios será accesible desde cualquier teléfono, de modo que una vez que una persona es identificada a través de patrones de voz o una tarjeta de identidad, cualquier teléfono público o privado se convierte en el teléfono privado del cliente con las ofertas usuales de servicios.

Con la continua pérdida de significancia de las fronteras internacionales y el advenimiento de una economía global, el mismo concepto podrá extenderse más allá de las fronteras nacionales, con la nueva dimensión de traducción instantánea del lenguaje e interpretación. En términos de la calidad de la presentación, futuros usuarios obtendrán la riqueza del ambiente "multimedia", con comunicaciones yendo desde voz de alta fidelidad hasta video 3-D, así como portabilidad en la forma de terminales inalámbricas ligeras. Para alcanzar esta meta, avances paralelos deberán realizarse a lo largo de los dos ejes de ancho de banda e inteligencia, así como diversas combinaciones de ambas tecnologías.

La capacidad de transmisión y distribución de la red telefónica depende del ancho de banda disponible. Este parámetro ha cambiado drásticamente con la evolución de la tecnología óptica. Los límites de ancho de banda para diferentes tecnologías se muestran en la figura.

Tanto la frecuencia de modulación como las pérdidas en el medio de transmisión favorecen a la fibra óptica para transmisión a alta velocidad. Esto dá el ímpetu para la rápida evolución de dispositivos ópticos de estado sólido usados en conjunto con electrónica de alta velocidad.

La evolución de las redes experimentales sigue a la disponibilidad de fuentes de luz con propiedades espectrales cada vez más refinadas. La figura muestra una serie de fuentes de luz desde los LED'S hasta láseres de retroalimentación distribuida sintonizables, contribuyendo a mayores velocidades de transmisión.

	1950 s	1960 s	1970 s	1980 s	1990 s
CONMUTACION	.CROSS-BAR	.CONTROL POR PROGRAMA ALMACENADO	.TARIFACION DIGITAL	.CONMUTACION DIGITAL LOCAL	.CONMUTACION DE BANDA ANCHA
TRANSMISION	.RADIO ANALOGICO .MULTICANALIZACION .COAXIAL		.SIST. CONEXION CRUZADA DIGITALES .SISTEMAS DE GANANCIA DE PAR DE LAZO DIGITALES .RADIO DIGITAL	.FIBRA .EQUIPO MULTIPLICACION CIRCUITOS DIGITALES	.FIBRA EN EL LAZO
SEÑALIZACION	.SEÑALIZACION EN BANDA SF Y MF		.SEÑALIZACION DE TARIFACION POR CANAL COMUN FUERA DE BANDA	.SERVICIO BASADO EN SEÑALIZACION USANDO BASE DE DATOS DE LA RED	.SEÑALIZACION EXTREMO A EXTREMO GLOBAL (CCS-7)
EQUIPO DE ABONADO	.PBX .MODEMS	.DISTRIBUCION AUTOMATICA DE LLAMADAS	.PBX SPC .TERMINALES INTELIGENTES	.PBX DIGITAL .LAN'S .PC'S .FACSIMIL	.CONMUTACION BANDA ANCHA .ESTACIONES DE TRABAJO
TECNOLOGIA DE COMUNICACION DE DATOS	.MODEMS		.CONMUTACION DE PAQUETES .CONMUTACION DE CIRCUITOS	.SISTEMAS DE GESTION DE ANCHO DE BANDA	.MODO DE TRANSFERENCIA ASINCRONO .CONMUTACION PAQUETES BANDA ANCHA
CAPACIDADES DE LA RED	.RUTEO ALTERNO AUTOMATICO		.SEÑALIZACION POR CANAL COMUN	.RUTEO DINAMICO NO JERARQUICO	.FLEXIBILIDAD MUNDIAL
SISTEMAS DE OPERACION DE REDES	.CONTABILIDAD DE MENSAJES AUTOMATICA	.GESTION DE RED DE TRAFICO	.PRUEBA MECANIZADA, MONITOREO ALARMAS, ADMINISTRACION DE TRAFICO	.CONTROL POR USUARIO .SISTEMAS EXPERTOS	.GESTION DE RED, INTEGRADA .OPS INTERNACIONAL AUTOMATIZADA
SERVICIO PUBLICO CONMUTADO	.MARCADO DE SERVICIO DIRECTO	.MARCADO DE SERVICIO DIRECTO INTERNACIONAL	.SERVICIO DE LLAMADA GRATUITA ("800")	.COMPETICION INTERNACIONAL Y LARGA DISTANCIA .SERVICIO "800" CONTROLADO POR CLIENTE .RDSI	.RDSI BANDA ANCHA
SERVICIO DE RED PRIVADA	.RED TANDEM "TIE TRUNK" .LINEAS PRIVADAS	.REDES PRIVADAS DE CONMUTACION COMPARTIDA	.REDES TANDEM ELECTRONICAS .BANDA VOZ CONM. $\leq 2.4$ kbps	.REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE	.RED DIGITAL DE SERVICIOS INTERNACIONALES
SERVICIO DE COMUNICACION DE DATOS	.SERVICIO DE DATOS EN BANDA DE VOZ	.DATOS EN BANDA DE VOZ CONMUTADOS ( $\leq 1.2$ kbps) .DATOS EN BANDA DE VOZ NO CONMUTADOS ( $\leq 9.6$ kbps)	.SERVICIO DATOS DIGIT. NO CONMUT. (56,64 kbps) .CONMUTACION DE PAQUETES PRIVADA .CONM. DE PAQ. PUBL.	.SERVICIO DIGITAL CONMUTADO (56 kbps) .DATOS NO CONMUTADOS (2,45 Mbps) .OSI	.CONMUTACION DATOS BANDA ANCHA (150 Mbps) -NO CONM. ( $\rightarrow 1.2$ Gbps) .DIF. PIO INTERNACIONAL

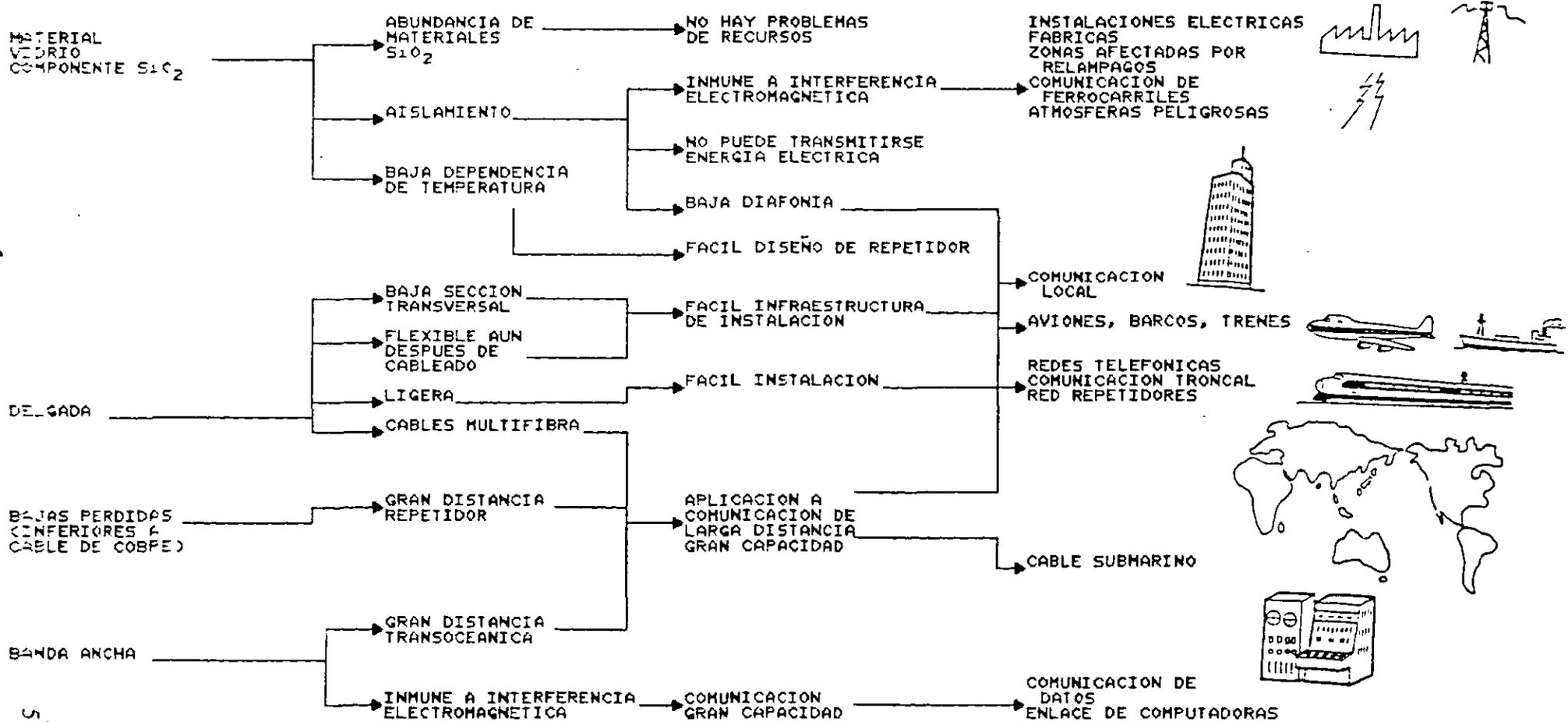
## FIBRAS OPTICAS: CARACTERISTICAS Y APLICACIONES

### PROPIEDADES DE MATERIAL Y ESTRUCTURA

### PROPIEDADES SECUNDARIAS

### CARACTERISTICAS EN LA APLICACION

### APLICACIONES



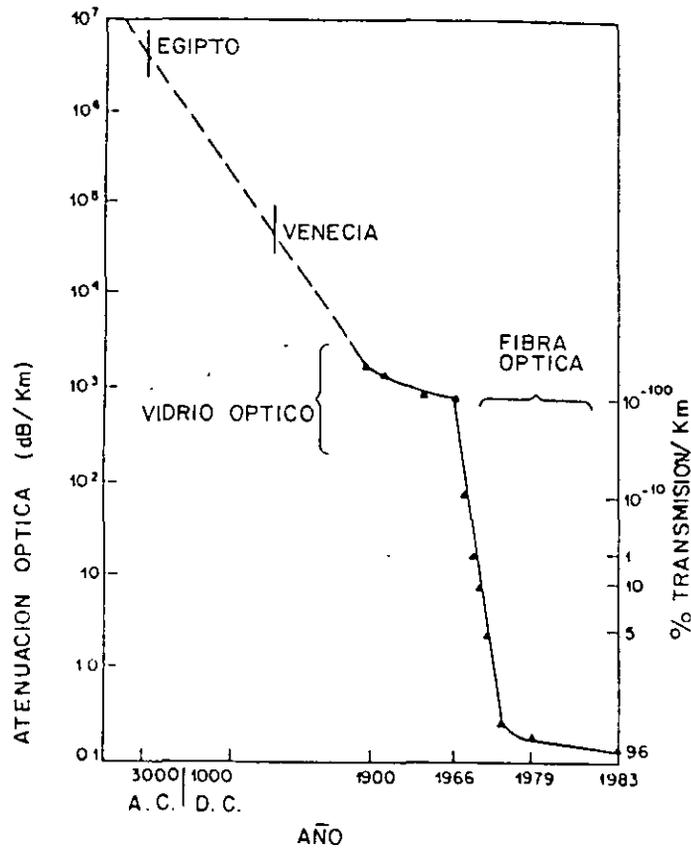


Figura 4

- \* La disminución progresiva de la atenuación por unidad de longitud del vidrio ha permitido la construcción de fibras ópticas para grandes distancias de transmisión.
- \* Actualmente la tecnología se encuentra muy cerca del límite de atenuación de Rayleigh.

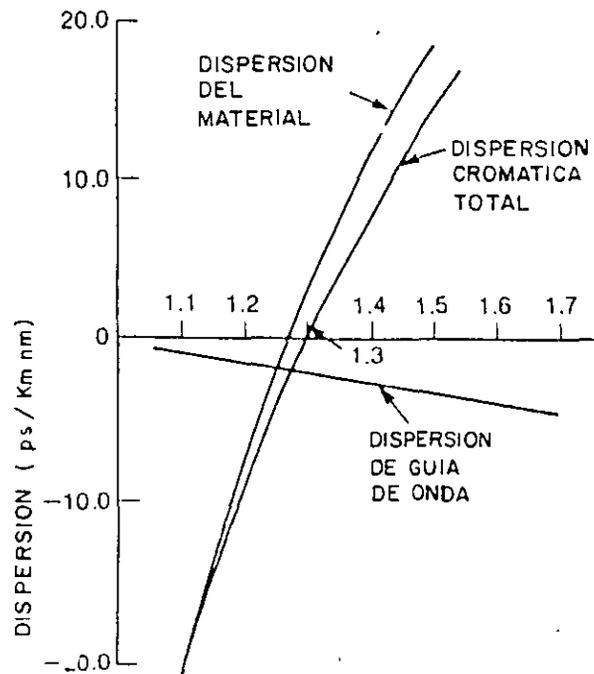


Figura 5

- \* En fibras ópticas unimodales, la contribución de la dispersión de material y de la de guía de onda produce un mínimo alrededor de 1.3 micrómetros.

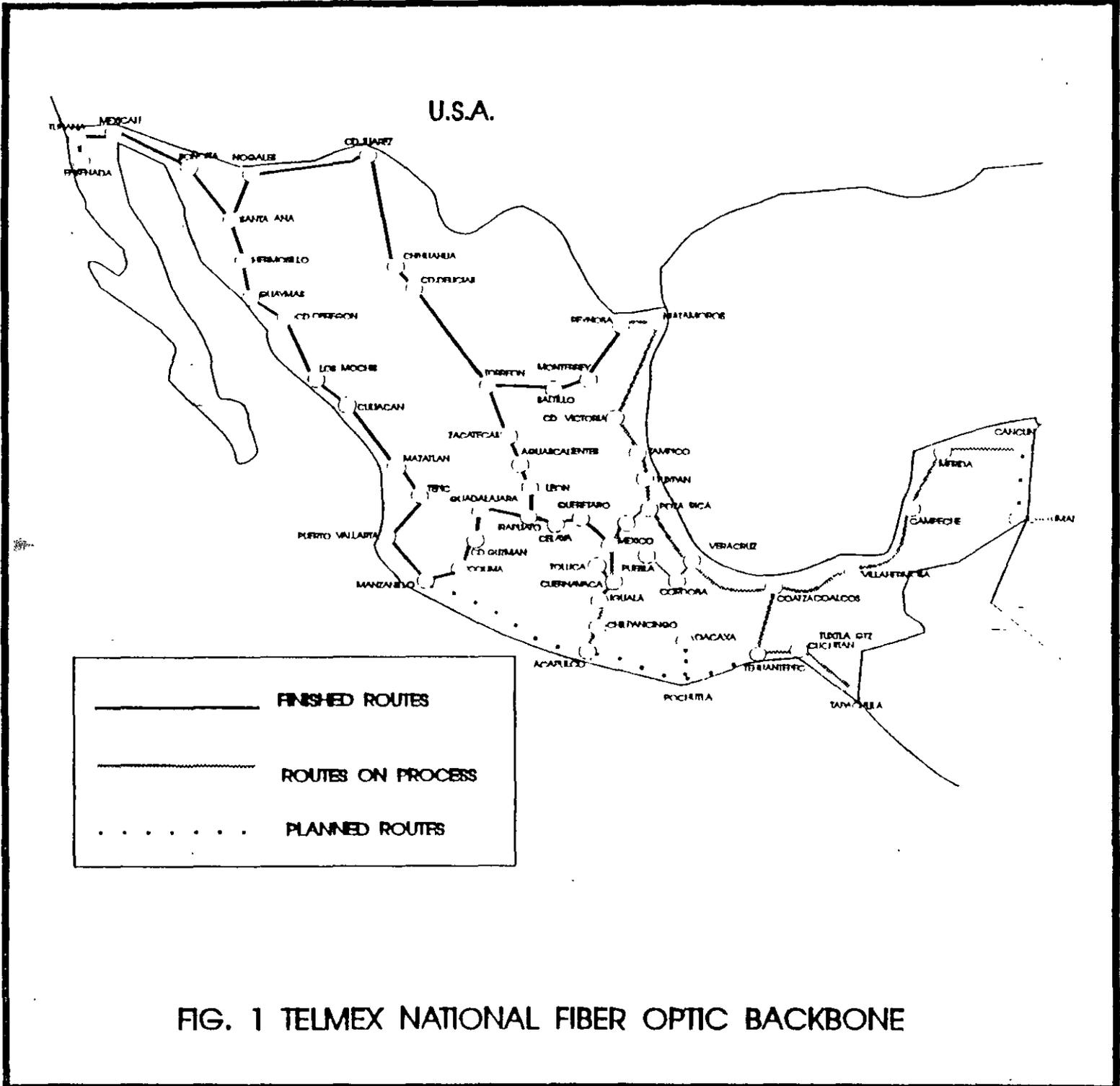


FIG. 1 TELMEX NATIONAL FIBER OPTIC BACKBONE

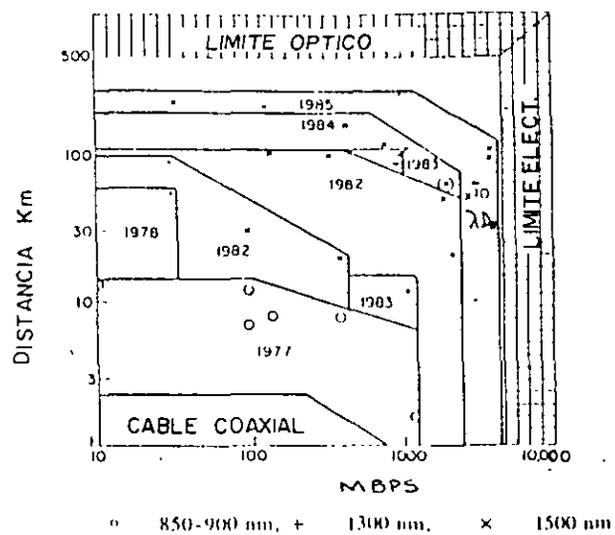


Figura 10

- \* Evolución de la velocidad de transmisión alcanzable en un sistema de comunicaciones ópticas.
- \* Los límites últimos están asociados a la generación de pulsos ópticos angostos y a la capacidad de la fibra (dispersión).
- \* Sin embargo los límites prácticos quedan fijados por los dispositivos de emisión, modulación y detección óptica.

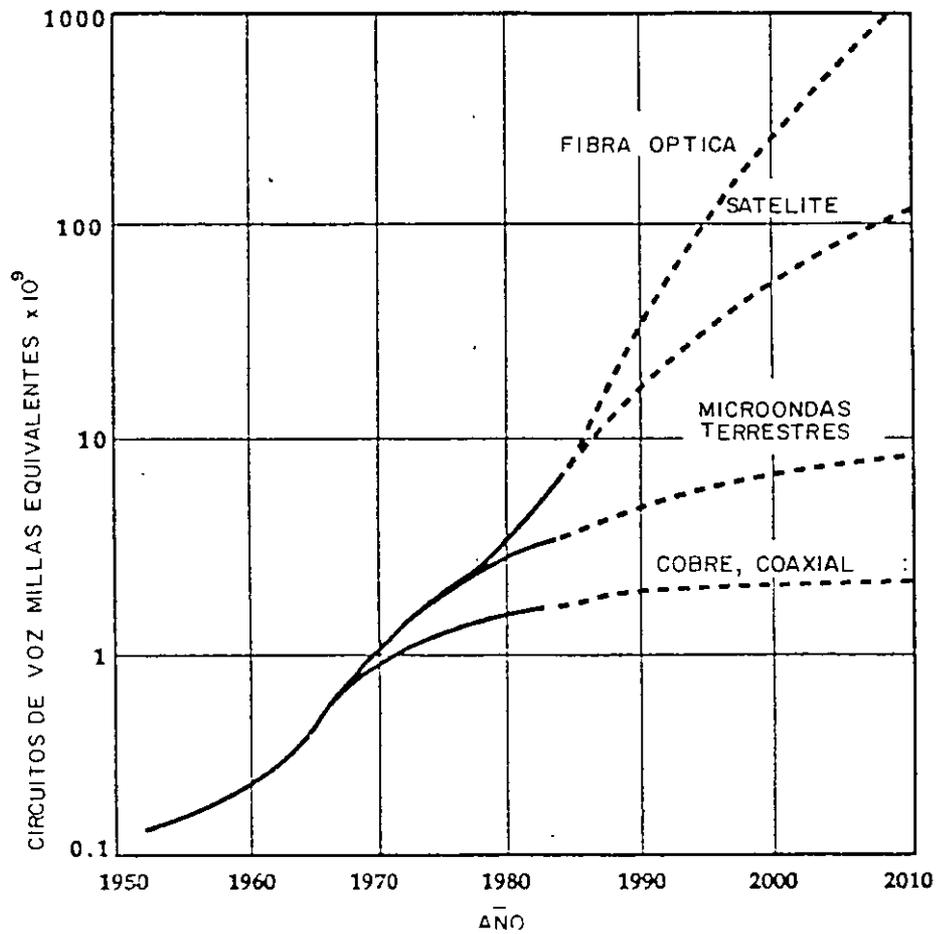


Figura 6

\* Evolución prevista para la capacidad (circuitos de voz por distancia) de diversos canales de transmisión, notándose una clara ventaja de la fibra óptica sobre otros medios.

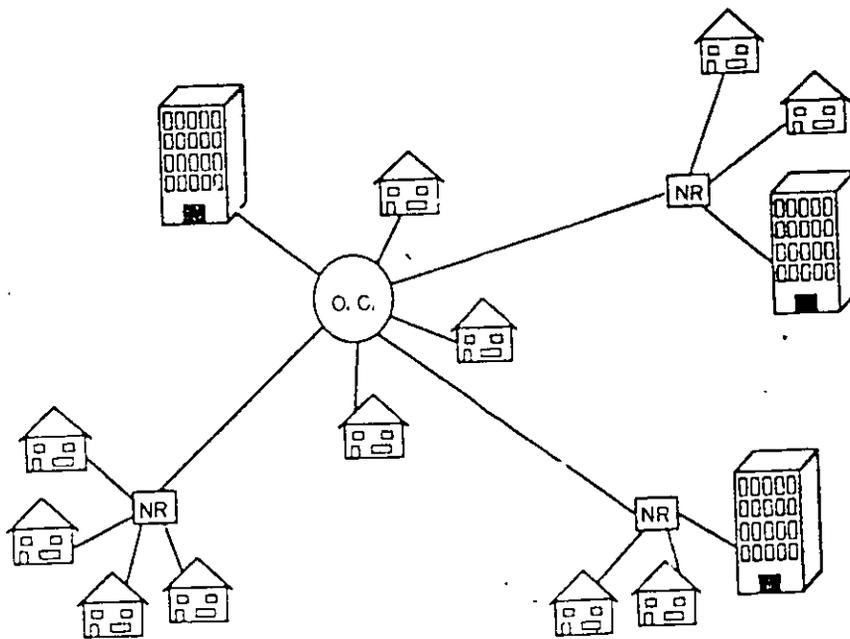


Figura 17

- \* Area de servicio de una central telefónica.
- \* Los abonados cercanos son servidos por fibras dedicadas.
- \* Los abonados remotos son servidos a través de topologías de doble estrella, con alimentadores compartidos y nodo remoto.

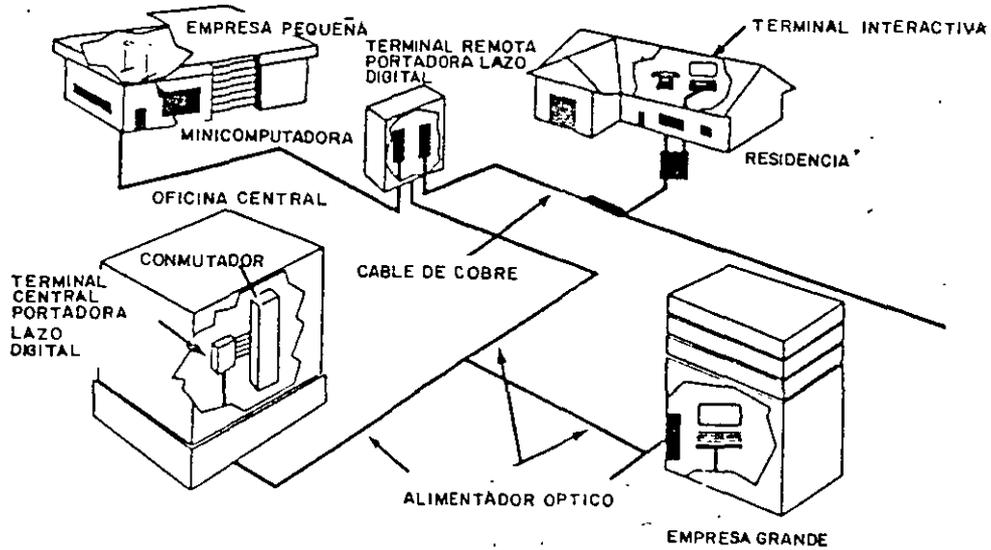


Figura 11

\* Distribución típica de la planta de transmisión digital.

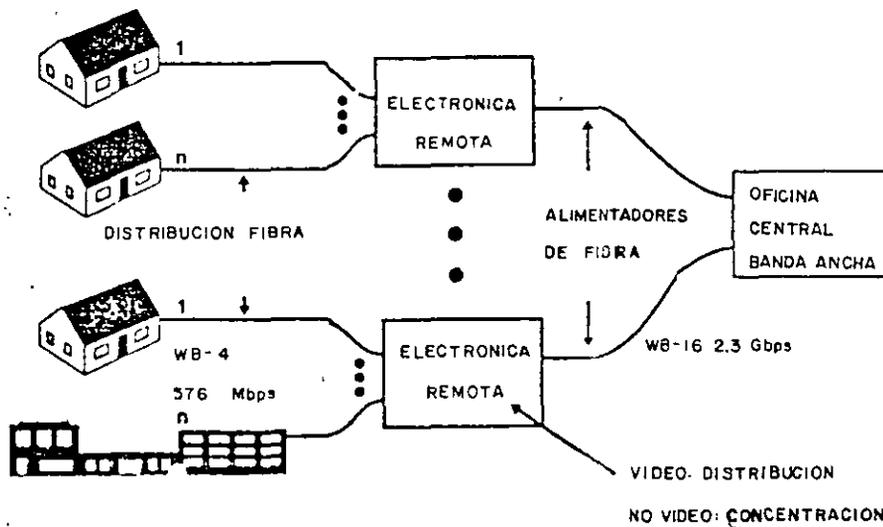


Figura 18

- \* Prototipo de una RDSI-BA en topología de doble estrella.
- \* Una estrella está representada por los alimentadores de fibra desde la central hasta la electrónica remota.
- \* La estrella de segundo nivel conecta a la electrónica remota a los abonados.

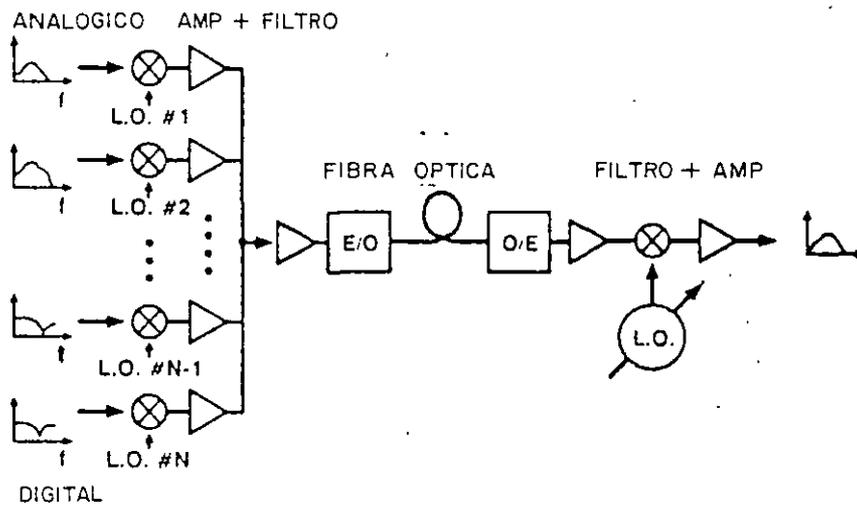


Figura 13

- \* En un sistema de multicanalización por división en frecuencia de subportadoras,  $N - 1$  canales son superpuestos previamente a la modulación óptica.
- \* En el receptor, un oscilador local sintonizable permite efectuar la conversión de bajada del canal deseado.

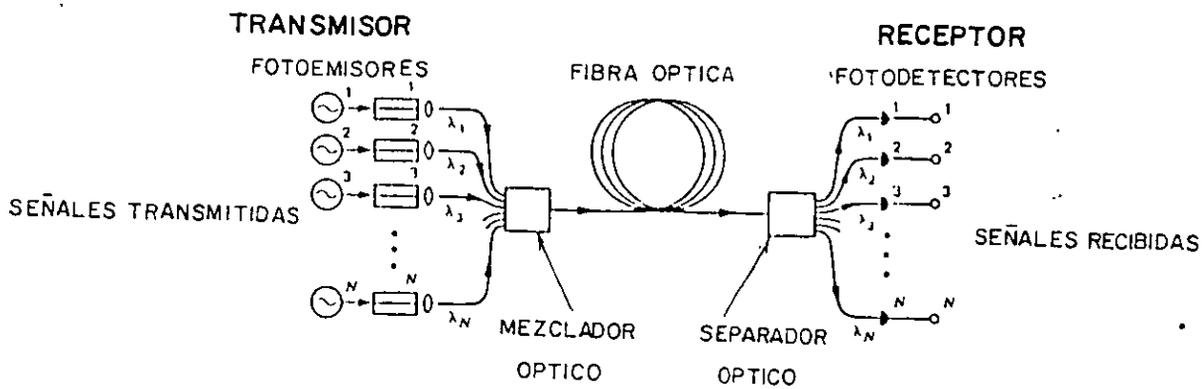


Figura 14

- \* En un sistema de multicanalización por división en longitud de onda,  $N$  portadoras ópticas generadas por  $N$  fotoemisores son superpuestas usando el mezclador óptico y transmitidas simultáneamente por una sólo fibra.
- \* En el receptor, un separador óptico efectúa la tarea de enviar una y sólo una longitud de onda a cada uno de los  $N$  receptores.

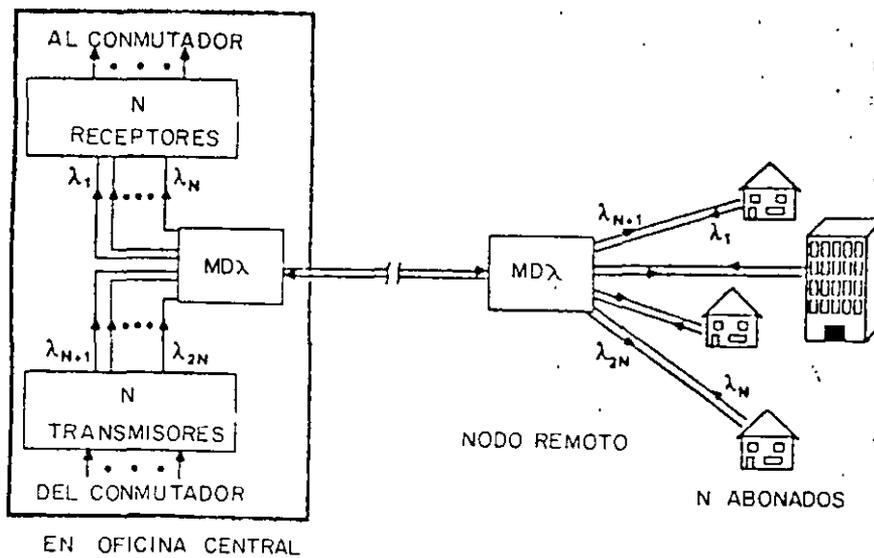


Figura 15

\* Arquitectura de lazo óptico pasivo empleando MDλ y enrutamiento al nodo remoto para obtener una ganancia de N:1.

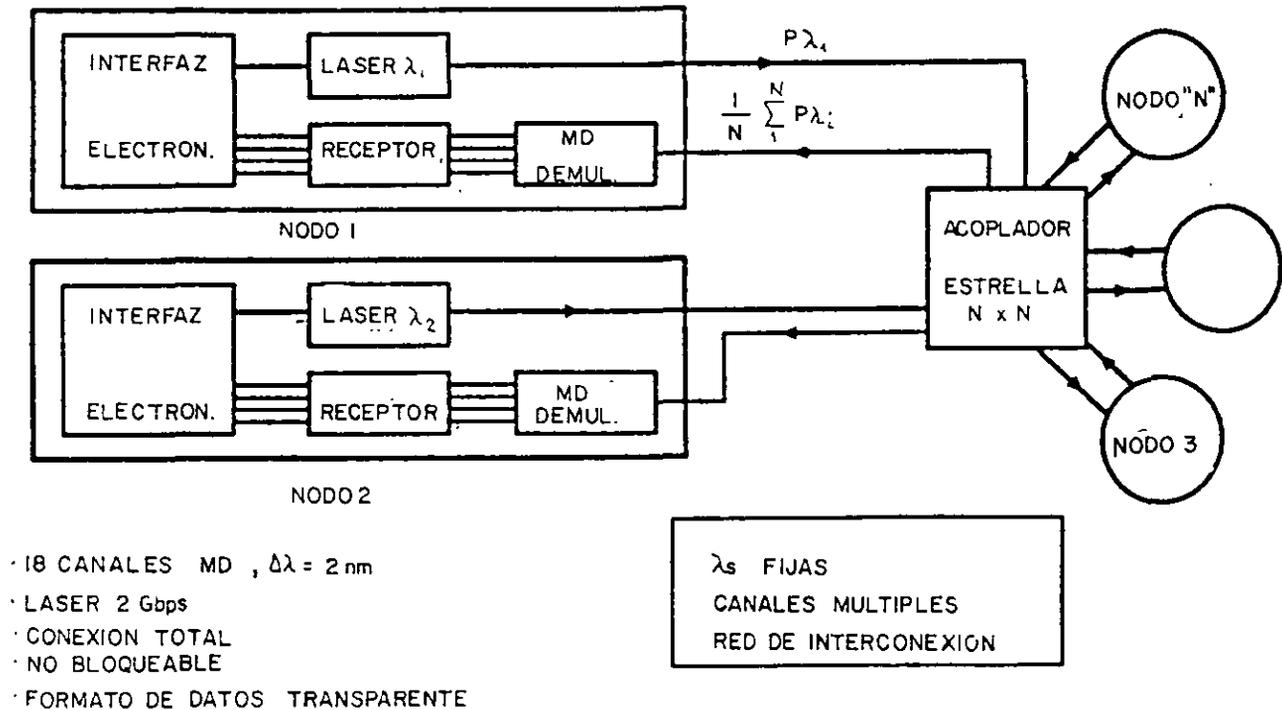


Figura 16

- \* Arquitectura de una red óptica en estrella multi- $\lambda$  para servicios de banda ancha.
- \* Es de interconexión total, no bloqueable y permite integración de servicios punto a punto y punto a multipunto de banda ancha.
- \* Características:
  - Datos de banda ancha y videoconferencia.
  - Velocidades variables desde telemetría hasta TVAD.
  - Control distribuido de la red.
  - Costo del transporte (transmisión y conmutación) disminuyendo progresivamente.

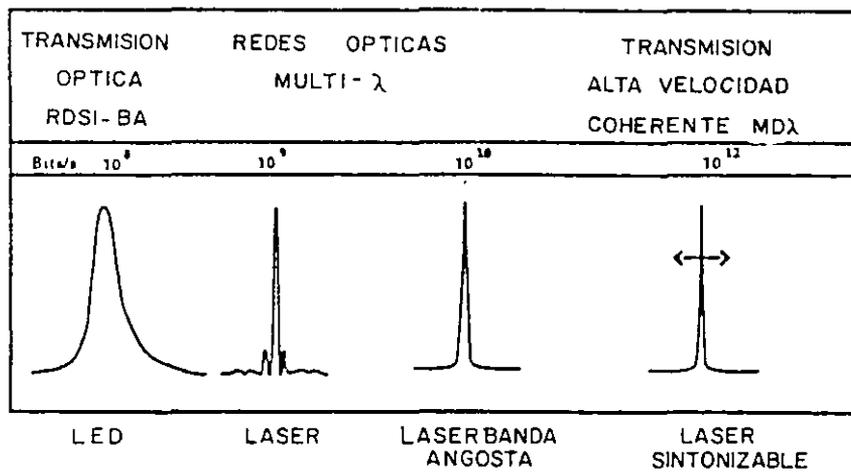


Figura 8

- \* Diversos elementos fotoemisores son utilizados, dependiendo de la aplicación.
- \* En RDSI-BA, los LED'S son preferentemente utilizados.
- \* En redes ópticas con multicanalización por división en  $\lambda$ , deben usarse láseres monofrecuenciales y, en algunos casos, láseres de banda angosta.
- \* En transmisión coherente y en sistemas MD $\lambda$ , láseres monofrecuenciales sintonizables deben ser usados.

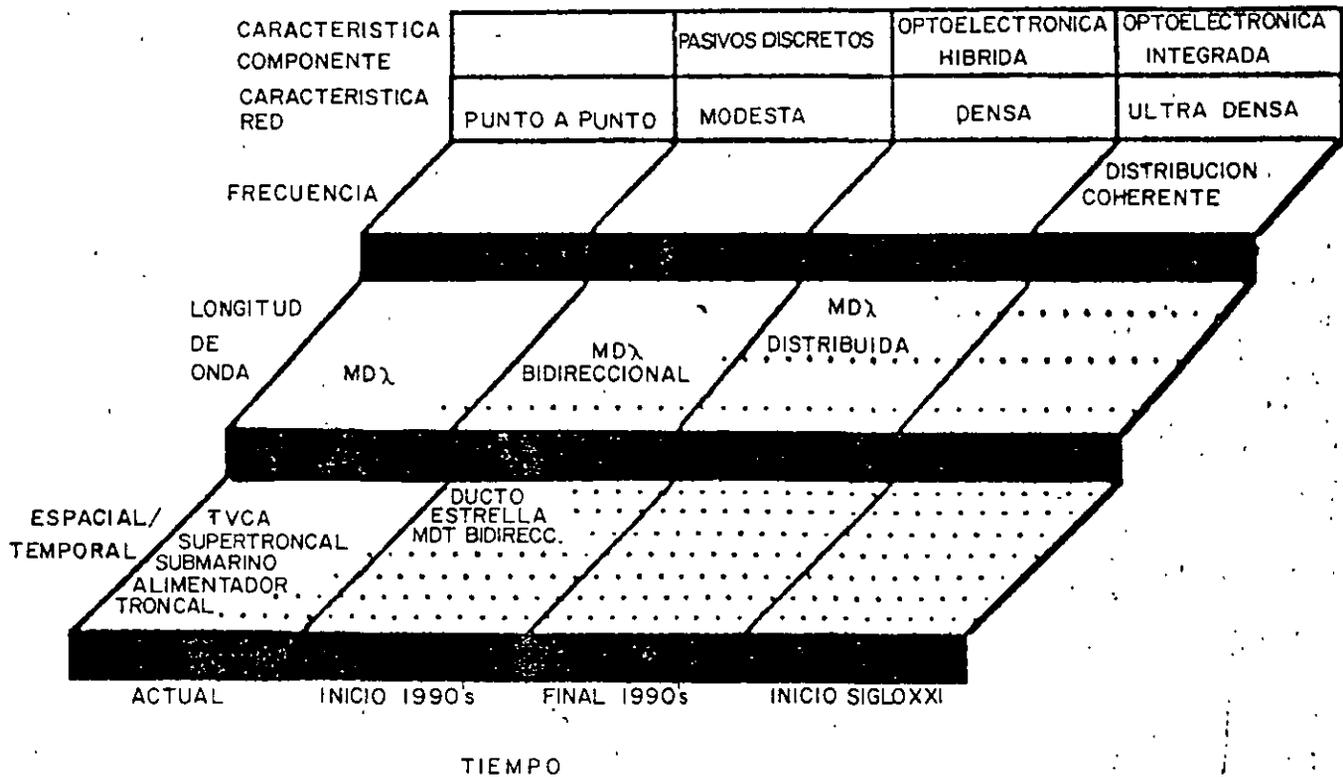


Figura 12

\* Evolución en la metodología de distribución en la medida que el lazo de abonado cambia de una topología punto a punto hacia un número grande de bifurcaciones.

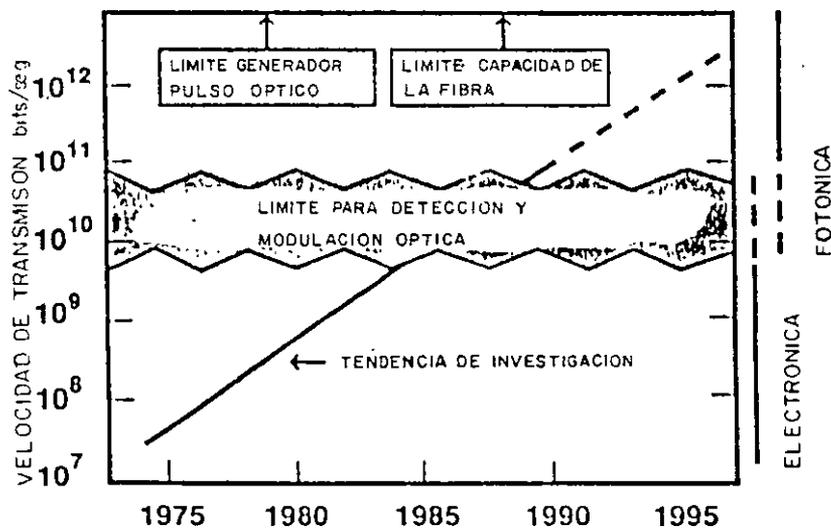


Figura 7

- \* Las distancias y velocidades de transmisión por fibras ópticas se han incrementado con el tiempo, estando cerca de alcanzar el límite electrónico y óptico.
- \* El límite electrónico está asociado a la máxima velocidad de respuesta de los dispositivos de extremidad.
- \* El límite óptico está asociado a la máxima potencia susceptible de ser transmitida sin distorsión por la fibra.

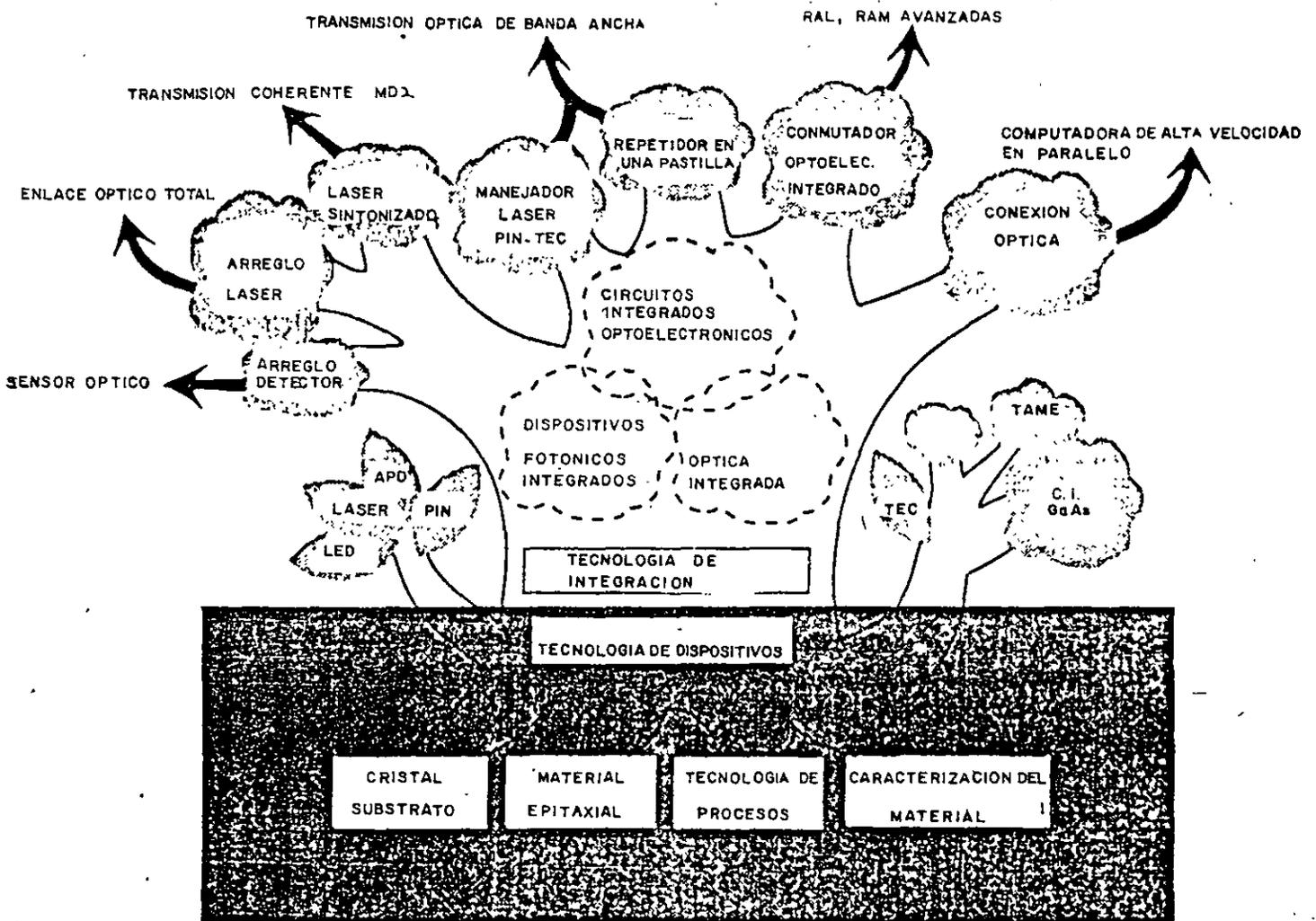


Figura 9

- \* Evolución de los dispositivos de estados sólido hacia la optoelectrónica integrada.
- \* Las flechas conducen a las diversas tecnologías involucradas.

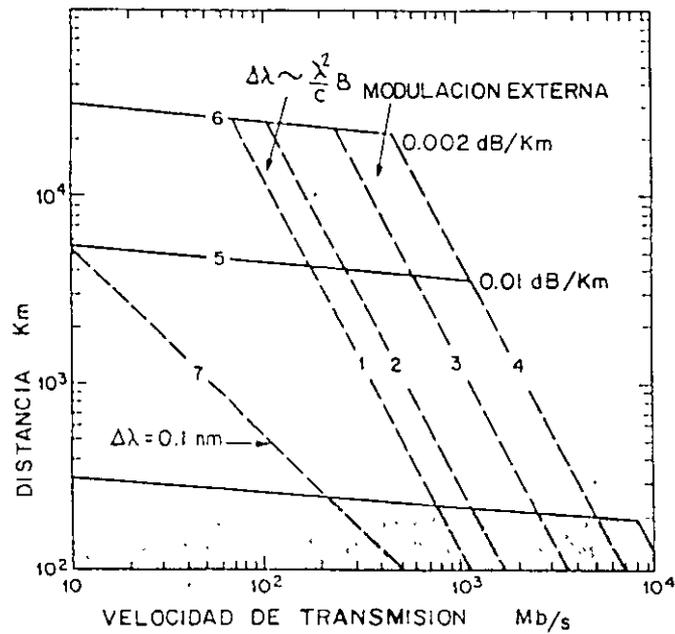


Figura 19

- \* Máxima distancia posible entre repetidores en función de la velocidad de transmisión para diversos sistemas ópticos.
- \* La región sombreada es representativa de las fibras ópticas de sílice.
- \* Las curvas 1-7 corresponden a las futuras fibras ópticas operando en el infrarrojo medio.

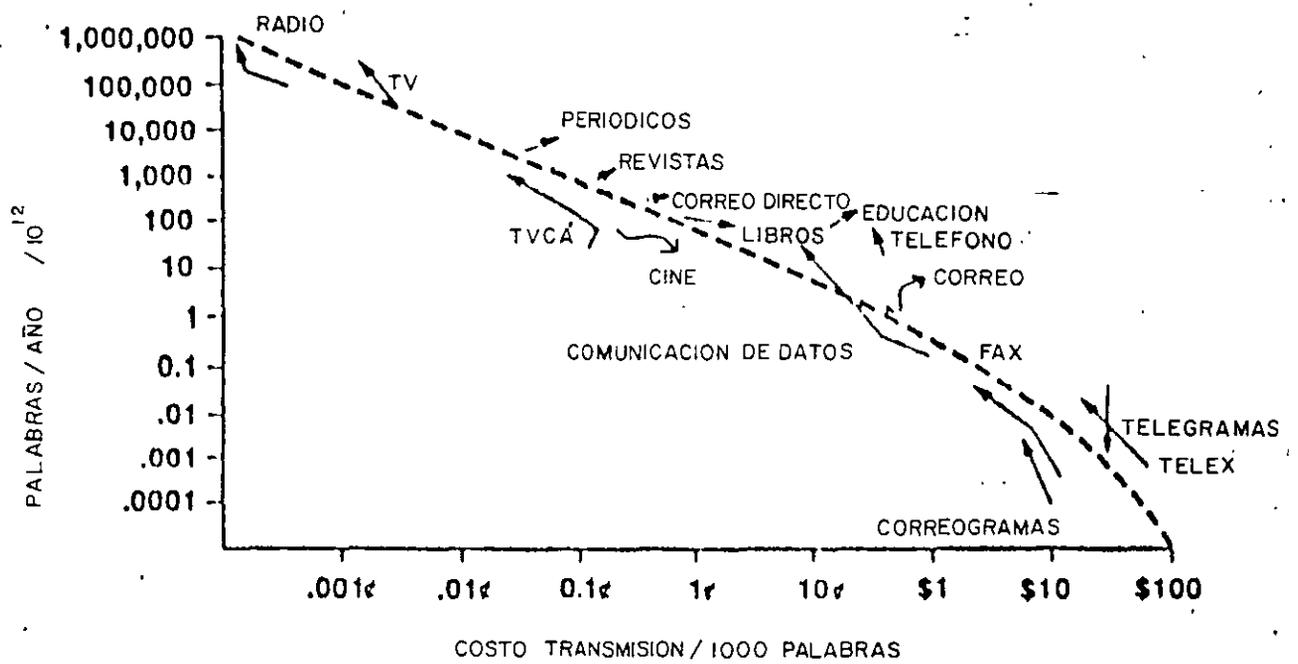


Figura 20

\* Comportamiento en volumen y costos (1960-1980) de las comunicaciones por diversos medios.

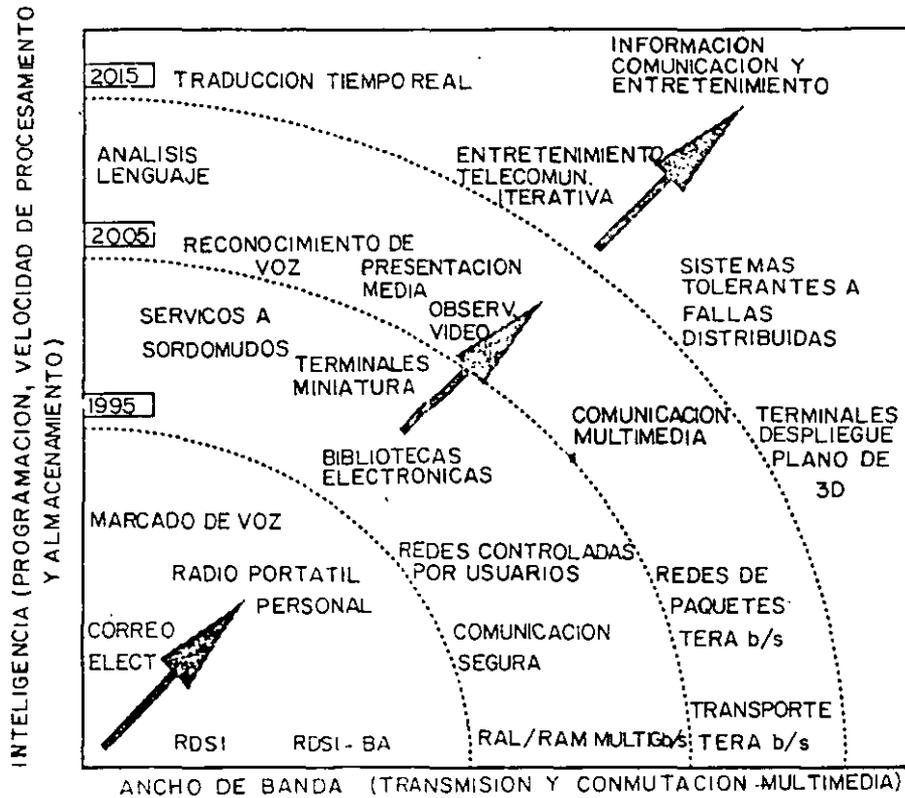


Figura 3

- \* Evolución de la telefonía tradicional hacia los servicios de la era de la información.
- \* Las características avanzadas de la red provienen de la sinergia del ancho de banda y de la inteligencia, tanto en la operación interna de la red como en los servicios ofrecidos.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**INSTALACIONES ÓPTICAS**

**CONFERENCISTA  
M. en C. RAÚL UGALDE M.  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

**UNAM DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSO INTRERNACIONAL DE COMUNICACIONES  
MODULO II TELECOMUNICACIONES VIA FIBRAS OPTICAS  
TEMA INSTALACIONES AUTOR ING. RAUL UGALDE MONCISVAIS**

## **1. INTRODUCCION**

La fibra no se ha instalado unicamente por sus ventajas técnicas, sino también porque se ha demostrado que resulta económicamente viable. Las Administraciones telefónicas son generalmente conservadoras; si la fibra no hubiera demostrado sus ventajas frente a otras tecnologías, no habría sido instalada, cualesquiera que hubieran sido sus beneficios técnicos.

Los procedimientos para instalación como jalado, manejo y terminación de los cables opticos son diferentes a los utilizados para instalar cables de cobre. Las técnicas de instalación han evolucionado con los cables opticos y en adición, excepto para fibra hasta el escritorio, los costos de instalación de fibra son a menudo menores que para otros tipos de cable.

Las ventajas de instalar cables opticos son: Su tamaño reducido, ser pequeños, ligeros y más flexibles que otros tipos de cable. La principal desventaja es el cuidado extra de manejo del cable para evitar dobleces excesivos y aplastamiento. Las tensiones de jalado son menores a las utilizadas para otros cables metalicos.

Finalmente la terminación mientras más rapida de los cables es aun más lenta que para un par de cobre. La gente que maneje fibra óptica cada vez tendrá más experiencia y su trabajo sera más facil cada vez.

## **2. PLANIFICACION DE UNA INSTALACION DE CABLES DE FIBRAS OPTICAS**

En general el cable de fibra optica para telecomunicaciones debe poderse instalar con los metodos tradicionales de tendido, pero se debe prestar atención especial a sus limites de esfuerzo muy bajos, sus características críticas de curvatura, los largos tramos de instalación posibles y el efecto de las condiciones ambientales.

### **2.1 PLANIFICACION DE LA INSTALACION**

La planificación puede basarse en muchos de los procedimientos utilizados para cables metalicos, pero se debe prestar especial atención a los siguientes aspectos:

- el efecto de las uniones y conectores sobre la longitud del tramo,
- la baja tolerancia del cable, en terminos de transmisión, a uniones adicionales,

-los tramos de cable más largo que puedan instalarse, la diferente construcción de los cables de fibra óptica y sus parámetros físicos más críticos, tales como los límites de esfuerzo sumamente bajos, las características de curvatura y la gama de temperatura ambiente,

-construcción y condiciones de ruta, y acceso a la misma, en tanto lo que se refiere a la instalación como al servicio y valor de la información local,

-el uso de métodos predictivos para proporcionar información sobre las tensiones de cableado máximas.

-la importancia de la información y capacitación como parte de la planificación de las instalaciones de cables ópticos.

## **2.2 CONOCIMIENTO DE LA RUTA**

Para el reconocimiento de la ruta se deben tomar en cuenta la geometría de las instalaciones existentes y la condición en que se encuentren y en especial en largas distancias, las disposiciones de acceso. Las canalizaciones deben estar en buen estado y por su tamaño reducido se pueden considerar sistemas de subcanalización para mejor aprovechamiento de las mismas. En los sistemas aéreos es importante reducir al mínimo el movimiento del cable en servicio y los esfuerzos y aumentar la estabilidad de la ruta de los postes. Cuando se necesite establecer nuevas estructuras, subterráneas o aéreas, se deben considerar los requisitos especiales de los cables ópticos en términos de diámetro menor, longitudes largas, límites críticos de curvatura, configuraciones de empalme grandes y límites de esfuerzo y movimiento.

## **2.3 LONGITUD TOTAL DEL ENLACE**

Esta longitud depende de la pérdida máxima del trayecto dentro de la cual se debe considerar pérdidas por cableado y empalmes, además una ruta que contiene una gran cantidad de instalaciones aéreas puede ser más corta debido a los márgenes por pérdidas causadas por temperaturas extremas.

## **2.4 LONGITUD TOTAL DEL CABLE**

Esta es la longitud de la canalización tomada de planos y confirmada por recorrido físico por el personal de diseño, a esta se debe añadir longitud adicional para cada empalme ( Permitir una vuelta completa de cable de repuesto alrededor del registro de acceso personal del empalme y fibra adicional en el cierre de empalme), también debe incluir el cable de acometida al edificio (central) desde la primera unión (última) exterior hasta el repartidor o distribuidor de FO ubicado cerca del equipo terminal.

La longitud adicional puede ser de 4 m (para caja de reserva) a 12 m.

## 2.5 LONGITUD DEL CARRETE

Esta será determinada por la longitud continua que puede producir el fabricante de cables y por el tamaño y peso del carrete que permita su fácil manejo sobre el terreno.

La separación máxima de las uniones depende de las características físicas de la ruta y de la longitud máxima de cable disponible (en carrete), los cables arados, directamente enterrados o en canalización en ductos requieren empalmes a distancias determinadas según criterios ya comentados, las longitudes de cable que pueden introducirse por tracción en ductos será menor debida a la resistencia limitada a la tracción y las posiciones especificadas para los registros de acceso personal.

Ejemplo de calculo de longitud de carrete:

La determinación de longitudes de carrete para canalización en ductos cuando se han fijado las posiciones de empalme es,

distancia entre uniones - de planos o medida	x(m)
margen de longitud	2% de x(m)
margen de empalmes+medicion, 10 m/extremo	20(m)

Longitud de carrete para longitud de canalizacion de x metros queda  $(1+0,02)x + 20$

## 2.6 NUMERO Y UBICACION DE LOS EMPALMES

Normalmente los empalmes se realizan a distancias de 1 a 3 km sin embargo depende si es canalización, directamente enterrado por las condiciones del terreno y en caso de instalación submarina se revisará más adelante.

Los empalmes se encuentran en los registros de acceso personal de los sistemas de canalizaciones, en registros de acceso manual, es decir pequeñas cajas enterradas, en instalaciones enterradas directamente o fijadas al cable sustentador de una línea aérea. En las instalaciones de distribución, los empalmes pueden situarse en cajas de unión, sobre la superficie, en lugares donde se proyecta reestructurar la red.

## 2.7 DERECHO DE VIA

La elección de una zona para el ejercicio del paso del cable óptico depende de varios factores, entre ellos el más importante la reglamentación nacional y por ejemplo a quienes se va a afectar:

Camino públicos afectados,  
Propiedades privadas afectadas,  
Instalaciones de otras entidades ( por ejemplo CFE, PEMEX, etc.)  
Posible utilización de canalizaciones ya existentes, etc.

## **2.8 MATERIALES Y DIAMETROS DE LAS CANALIZACIONES Y TUBERIAS**

Los materiales utilizados normalmente son PVC y PE, los diámetros se 40 a 100 mm.

## **2.9 SECCIONES DE CABLE (O TUBERIAS DE RESERVA) ARADAS O DIRECTAMENTE ENTERRADAS**

Los cables ópticos se entierran directamente en trincheras o surcos arados, las trincheras tienen menos exigencias y permiten instalar el cable con mas suavidad pero son mas costosas que el arado

## **2.10 SECCIONES DE CABLE AEREO**

Se deben tomar en cuenta las siguientes características de la primera de esas soluciones:

### **VENTAJAS:**

- aspectos económicos;
- uso de líneas de postes existentes;
- independencia de las condiciones del suelo;
- rapidez de instalación
- posibilidades de cableado en tramos largos;
- facilidad de mantenimiento cuando los cables se tienden a lo largo de caminos

### **DESVENTAJAS:**

- una vida útil más corta debida a factores ambientales;
- peligro de esfuerzo excesivo del cable en condiciones especiales como viento, carga de hielo claros muy largos, etc.
- susceptibilidad a cierto tipo de averias (vandalismo, tormentas
- consideraciones estéticas

## **2.11 INFORMACION Y CAPACITACION**

Los técnicos que instalen cables ópticos deben tener clara conciencia de las diferencias entre cables metalicos y ópticos.

## **3. TECNICAS DE INSTALACION**

### **3.1 INSTALACION EN CANALIZACIONES**

El diámetro reducido y la relativa resistencia baja de los cables ópticos requieren cierta planificación y precauciones durante la instalación, entre los factores que limitan la longitud que puede introducirse en un conducto se cuentan:

- el número y grado de las curvaturas;

- los cambios de configuración y desniveles entre los registros
- la desalineación de canalizaciones, secciones dañadas y reparadas y condición general de las mismas

Como técnicas utilizadas para reducir al mínimo estos factores y permitir máxima distancia entre uniones se cuentan:

- introducir el cable desde un punto intermedio en ambos sentidos luego de la colocación inicial o bien poner el cable en forma de ocho antes de la segunda tracción;
- jalar en un sentido con salida en los registros de acceso personal intermedios, donde la canalización cambia bruscamente de dirección o a cada lado de una sección difícil conocida;
- jalar en las pendientes hacia abajo no hacia arriba;
- utilizar lubricación adecuada;
- limpiar cada canalización y verificar que este despejada;
- utilizar puntos de tracción intermedios;
- utilizar un dispositivo adecuado de guía de cables.

Por medio de la elección adecuada de superficies de apoyo y guías, se debe garantizar que el radio de curvatura del cable en tensión no se reduzca más allá de lo especificado.

### **3.2 CABLE DIRECTAMENTE ENTERRADO**

Los cables ópticos se pueden enterrar directamente excavando trincheras, normalmente 1 cable se maneja desde un portacarretes motorizado. La alineación de la trinchera debe mantenerse lo más recta posible para facilitar el tendido del cable. Una vez colocado el cable óptico en la trinchera de debera rellenar con finos y ser compactado, el cable se deberá recubrir hasta una profundidad de 0,6 m a 1,0 m, según los reglamentos pertinentes.

Los cables o tubería pueden tenderse en la trinchera a mano o por medio de carretes o directamente desde un vehículo móvil. Cuando se tienden tuberías de reserva, se debe tener cuidado de enderezar cualquier curvatura de la tubería causada por su enrollamiento en un carrete estirándola durante el proceso de tendido, a fin de evitar curvas adicionales.

Los cables y las tuberías de reserva deberán marcarse con una cinta especial por ejemplo de Polietileno, colocada a 30 cm arriba del cable y con una advertencia que indique la presencia de un cable de telecomunicaciones.

### 3.3 ARADO

En tramos largos y sin obstrucciones, se debe considerar este económico método. La tensión del cable instalado puede reducirse añadiendo una pieza de baja fricción en el arado y usando grandes radios de curvatura. Se debe utilizar un cabrestante eléctrico de gran diámetro, montado en la parte posterior de aplanadora para jalar el cable del carrete y presentarlo al conducto del arado bajo tensión mínima. Hay que evitar las elevadas tensiones transitorias provocadas por una velocidad excesiva o latigüeo del carrete debido a los cambios bruscos de velocidad o de dirección de la aplanadora.

Las cintas marcadoras se pueden instalar al mismo tiempo, unos 30 cm por encima del cable o la tubería de reserva. El cable deberá tenderse a una profundidad de 0,8 m a 1,0 m.

### 3.4 INSTALACION AEREA

El método para la instalación aérea de cables depende de la estructura del cable, es decir si se utiliza la construcción autoportada o la suspensión continua

#### Estructura de cable autoportado

El cable se tiende primero a lo largo de la línea de postes, con rodillos de cable ubicados al lado de los postes. Según las condiciones de terreno esto se hace utilizando vehículos de instalación o estirando el cable a mano.

Los límites de las condiciones de instalación, o sea la temperatura mínima de instalación, fuerza máxima de tracción, etc., deben concordar con lo indicado por el fabricante del cable.

Se pueden utilizar claros de diferentes longitudes si se escoge la flecha adecuada, teniendo en cuenta los posibles excesos de carga. Para reducir al mínimo los daños provocados por vehículos de gran altura, los cables deben instalarse en el extremo superior de los postes.

El cable se iza sobre los postes. Luego de igualar la flecha a todo lo largo del cable, este se fija a los postes.

#### Estructura de suspensión continua.

El cable se ata al alambre de sustentación, sea en el suelo o en los postes. El alambre de sustentación debe tensarse antes de esa operación para evitar un alargamiento excesivo del cable. Se debe tener cuidado para evitar daños a la cubierta durante el proceso de sujeción, debidos por ejemplo, a una tensión demasiado elevada del alambre de fijación al cable.

Si el alambre de sustentación no se fijó previamente a los postes, el cable se tiza, y tras igualarse sus flechas, se fija a los postes.

### 3.5 INSTALACION SUBMARINA

#### Instalación subacuática

Cuando es necesario cruzar un río o un lago o instalar un cable óptica bajo el agua se deben planificar los siguientes aspectos:

- disponer de cable especialmente fabricado para uso subacuático, generalmente con una protección de armadura de alambre;
- evitar los empalmes bajo el agua, previendo una sección continua siempre que sea posible;
- evitar el movimiento del cable durante el servicio en cualquier plano, por arado, o lanzando el cable de modo que penetre al fondo;
- el tendido del cable se realiza desde una barcaza o un pequeño barco cablero dandose al cable una holgura de un pequeño porcentaje;
- si se requiere de un empalme a la mitad del tramo, se deben tomar las disposiciones para mantener la resistencia de la armadura a través de la unión y el cierre debe soportar la presión del agua sin permitir infiltraciones.

#### Instalación Submarina

El gran auge que han tenido los enlaces transoceanicos se tienen las más recientes como el sistema TAT-9 America-Europa listo para entrar en operación este sistema utiliza 3 pares de fibras cada uno con una capacidad de 565 Mbps y la tendencia se ve hacia la utilización de amplificadores de fibra óptica (utilizando tierras raras como el Erbium, los cuales modificarán seguramente los esquemas actuales de diseño de enlaces, estos sistemas se espera entren en operación en 1995/6 TAT-12 y TPC-5 con distancias de transmisión de 6,500 y 9,000 km respectivamente. El TAT-12 operará a 5 Gbps con espacio de repetidores de 30 a 40 km.

Además Telmex anunció que tendrá su propio cable submarino " COLUMBUS II " que partiendo de Cancun a Quintana Roo, se enlazará con USA, el Caribe, España, Portugal e Italia, su entrada en servicio está prevista para diciembre de 1994 con una capacidad de 22,680 circuitos en su segmento trasatlántico capaz de manejar mas de 90,000 conversaciones simultáneas.

Los cables para ser instalados en enlaces transoceanicos en el fondo del mar deben ser capaces de asegurar estabilidad e integridad de las fibras para una vida de sistema minima de 25 años.

La instalación de cables submarinos se realiza con barcos especializados para llevar e instalar miles de kilometros con empalmes en el mismo cable y repetidores que se hacen en el mismo barco, hoy en día existen complejos sistemas robotizados con control a distancia para revisar y acomodar el lecho marino en el cual sera depositado el cable.

El cable debe cumplir entonces los siguientes requisitos:

- proporcionar una ambiente libre de humedad, hidrogeno y presión a las fibras;
- asegurar minimos esfuerzos en las fibras durante la instalación y ser muy reforzado en profundidades bajas susceptibles de problemas por anclas;
- permitir tramos de fabricación continuos largos, 80 a 150 km;
- proporcionar la posibilidad de conducir corriente a los repetidores

### 3.6 RECORRIDOS VERTICALES

En la mayoría de los casos los cables de fibras pueden introducirse verticalmente en edificios, utilizando las mismas tecnicas de instalacion y el mismo tipo de sujeciones empleadas para cables de cobre.

Cuando se necesita tender el cable verticalmente en un edificio, un estribo de puente u otra construcción similar, y segun la estructura del cable, se deben insertar bloques de anclaje de epoxy para sujetar las fibras y la estructura del cable como una unidad. Por ejemplo, esos bloques se aplican en ciertos tipos de cable con los siguientes intervalos:

- cable de terminacion interno-----cada 3 metros
- cable relleno-----cada 30 metros o menos

El primer bloque de anclaje se coloca en el extremo superior de la seccion vertical. Se deben tomar medidas para sostener cada bloque de anclaje mecanicamente en esa sección.

#### **4. PROCEDIMIENTOS DE UNION O EMPALME**

Las pérdidas en uniones ( o empalmes) y conectores son un parámetro de gran interés de los sistemas de transmisión óptica, ya que la pérdida total en las uniones puede contrinuir en forma considerable al balance de pérdidas del sistema. Esto es importante, y a que la mayoría de los sistemas actuales están limitados por las pérdidas. La pérdida en una conexión equivale a la adición de una longitud determinada. En términos de atenuación, la longitud posible de un enlace sin repetidores puede reducirse en kilómetros si esta perdida no se mantiene al mínimo. Ya que una de las ventajas de enlaces ópticos reside en que las estaciones repetidoras están muy espaciadas, resulta evidente la necesidad de conexiones con bajas pérdidas. Su obtención práctica es difícil, puesto que los procedimientos de empalme deben realizarse sobre el terreno. Las uniones no han de incluir partes delicadas que sesan difíciles de manejar o requieran procedimientos de ensamble completos. Para que las conexiones puedan realizarse con un mínimo de capacitación es indispensable contar con material confiable y procedimientos de ensamblaje sencillos. Es neceseario aplicar técnicas económicas y adecuadas a los trabajos sobre el terreno, para efectuar uniones de fibra con baja pérdida y alta confiabilidad. También es necesario contar con una forma de medir las pérdidas de las uniones.

Para proporcionar enlaces de fibras ópticas es necesario empalmar tramos adyacentes de cable. La principal condición que deben cumplir los empalmes es transferir la potencia máxima posible entre las fibras conectadas.

Se considera que existe un capítulo dedicado exclusivamente a empalmes de fibra óptica en este curso por lo que no se profundizará más en este tema.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

1. Instructivos técnicos para la Construcción de la Red Troncal Vía Fibra Optica  
Gerencia de Normas y Especificaciones TELMEX
2. Reporte Asistencia AMERICAS TELECOM 92  
CIDECON CONDUMEX Raúl Ugalde
3. Pirelli Submarine Optical Links  
Società Cavi Pirelli
4. Guía para Planificación de Sistemas de Fibras Opticas  
UNION INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES 1990



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**IX CURSO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES**

**MÓDULO III**

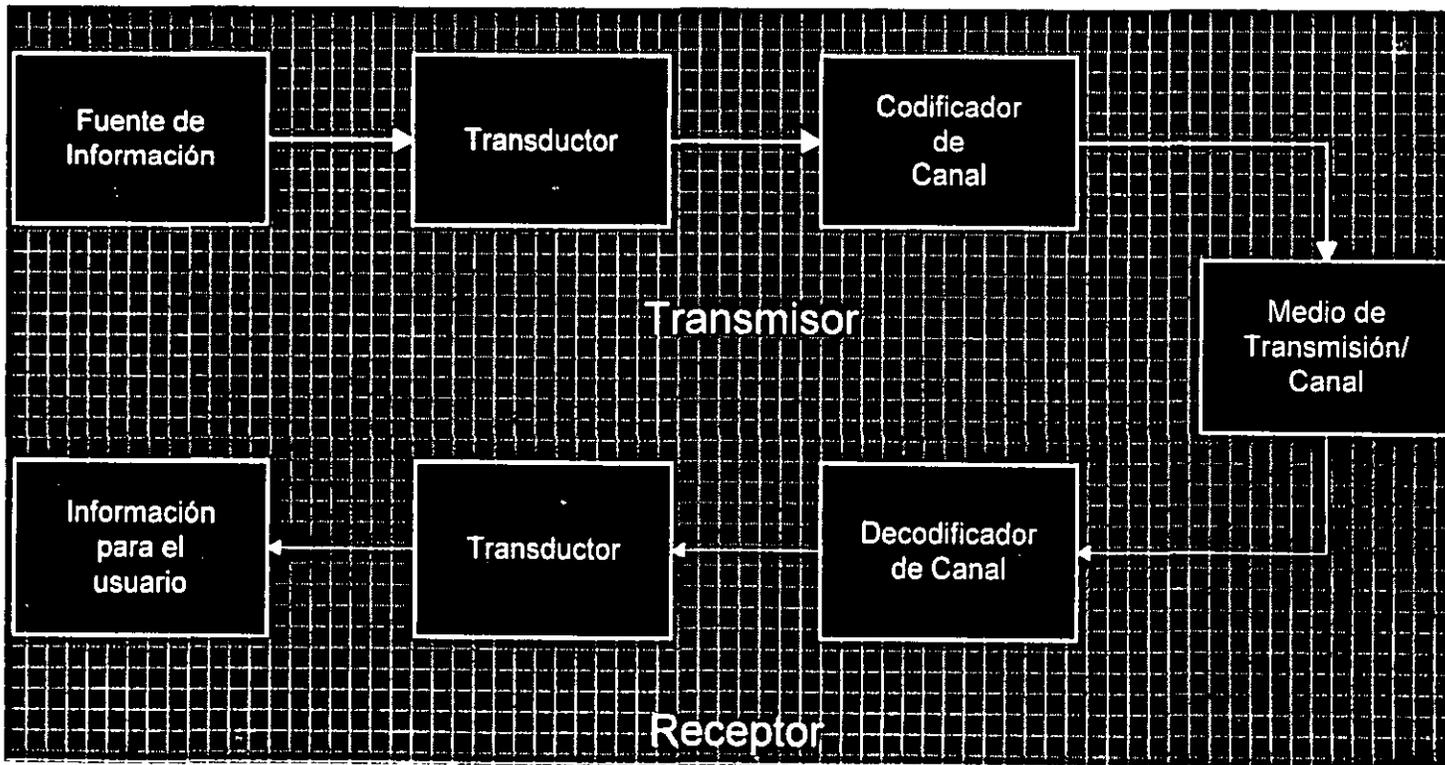
**TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA**

**TEMA**

**ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES**  
**TÍPICO**

**CONFERENCISTA  
DR. FRANCISCO J. MENDIETA JIMÉNEZ  
PALACIO DE MINERÍA  
MAYO 2000**

# *Elementos de Un Sistema de Comunicaciones Típico*



# **FRECUENCIAS Y LONGITUDES DE ONDA DE PORTADORAS ÓPTICAS**

<b>Longitud de onda (<math>\mu</math>)</b>	<b>Frecuencia (THz)</b>
<b>0.85</b>	<b>353</b>
<b>1.31</b>	<b>229</b>
<b>1.55</b>	<b>194</b>

$$f=c/\lambda$$

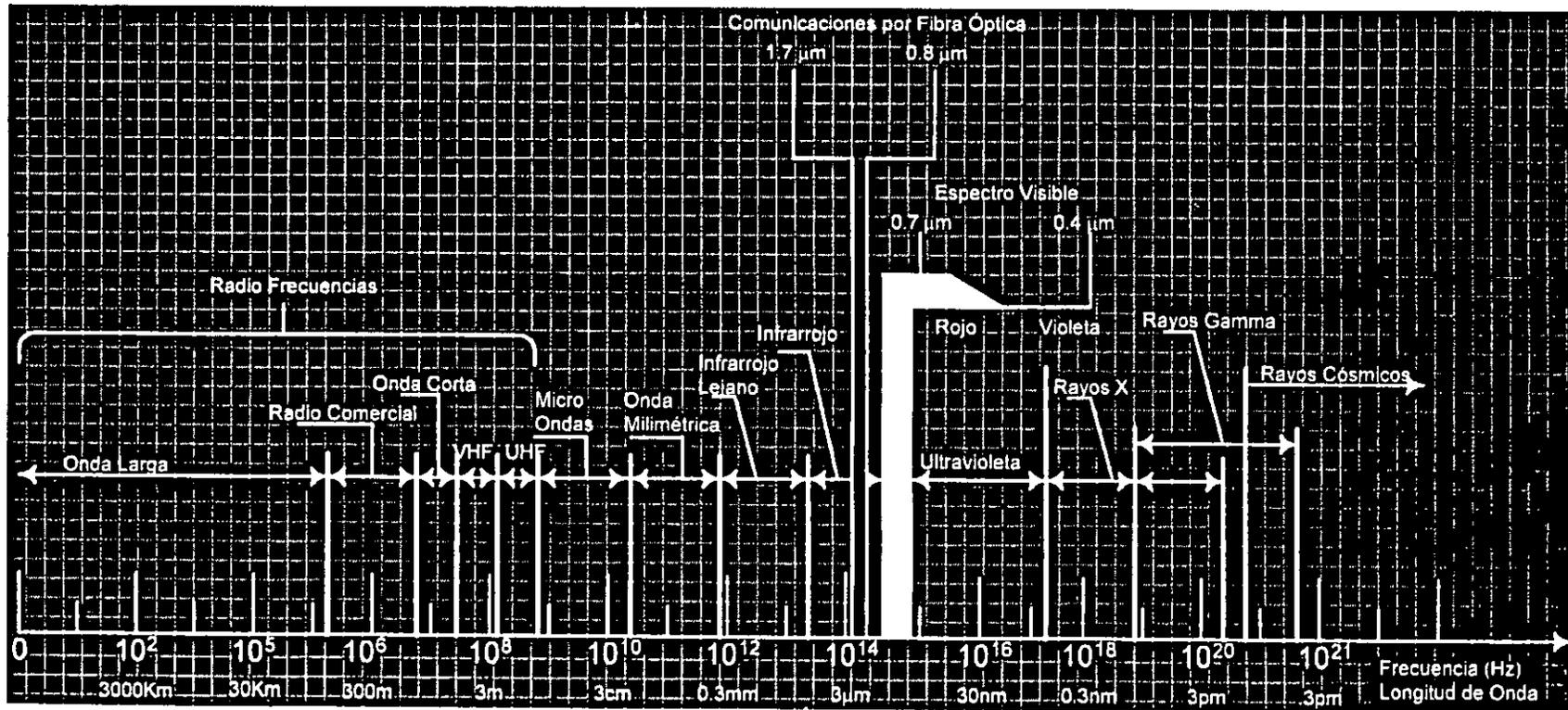
**donde:**

**f: frecuencia de la señal [Hz]**

**c: velocidad de la luz  $2.998 \times 10^8$  [m/s]**

**$\lambda$ : longitud de onda [m]**

# Espectro Electromagnético



### Possible services on fiber-optic networks.

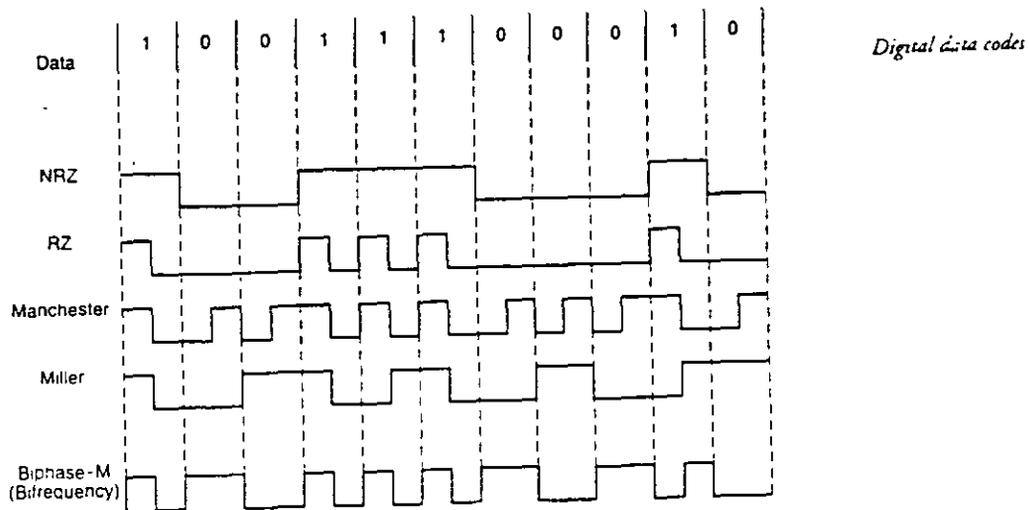
<i>Service</i>	<i>Bandwidth Requirement</i>
Wire telephone	56 kbit/s
Cellular telephone	56 kbit/s
Computer data	56 kbit/s or up
Compressed video (conventional)	1-2 Mbit/s per channel
High-definition TV (compressed)	20 Mbit/s per channel
Switched video on demand	20 Mbit/s per channel
Interactive video	56 kbit/s - 1 Mbit/s
Video telephone/videoconferencing	56 kbit/s - 1 Mbit/s
Telecommuting	56 kbit/s - 1 Mbit/s and up
Simultaneous voice/data transmission	Circa 100 kbit/s
Electronic mail	Low
Automatic meter reading	Low
Fire/burglar alarms	Low
Home monitoring systems	Low
Home remote-control systems	Low
Computer conferencing	56 kbit/s or up
Videotex	56 kbit/s or up
Information services	56 kbit/s or up
Home banking	Low
Home shopping (teleshopping)	56 kbit/s - 1 Mbit/s
Educational services	56 kbit/s - 1 Mbit/s
Advanced voice capabilities	56 kbit/s or up
Facsimile transmission	56 kbit/s
High-quality digital audio	100 kbit/s
Energy management	Low
Video surveillance for home security	56 kbit/s - 1 Mbit/s

**Typical performance of fiber-optic trunk systems  
with laser sources.**

<i>Generation</i>	<i>First</i>	<i>Second</i>	<i>Third</i>	<i>Fourth</i>
Wavelength	850 nm	1300 nm	1300 nm	1550 nm
Fiber	graded-index multimode	graded-index multimode	step-index single mode	single mode, step-index or dispersion-shifted
Data rates	45 Mbit/s	90 Mbit/s	400 Mbit/s to 2.5 Gbit/s	to 2.5 Gbit/s now; 10 Gbit/s in lab
Fiber loss	3-4 dB/km	1 dB/km	0.35 dB/km	0.25 dB/km
Repeater spacing	8 km	20 km	40-50 km	80-100 km (thousands of km with optical amps)
Limits	Loss, fiber bandwidth	Loss, fiber bandwidth	Loss, source bandwidth	Loss, source bandwidth

**Submarine cable designs.**

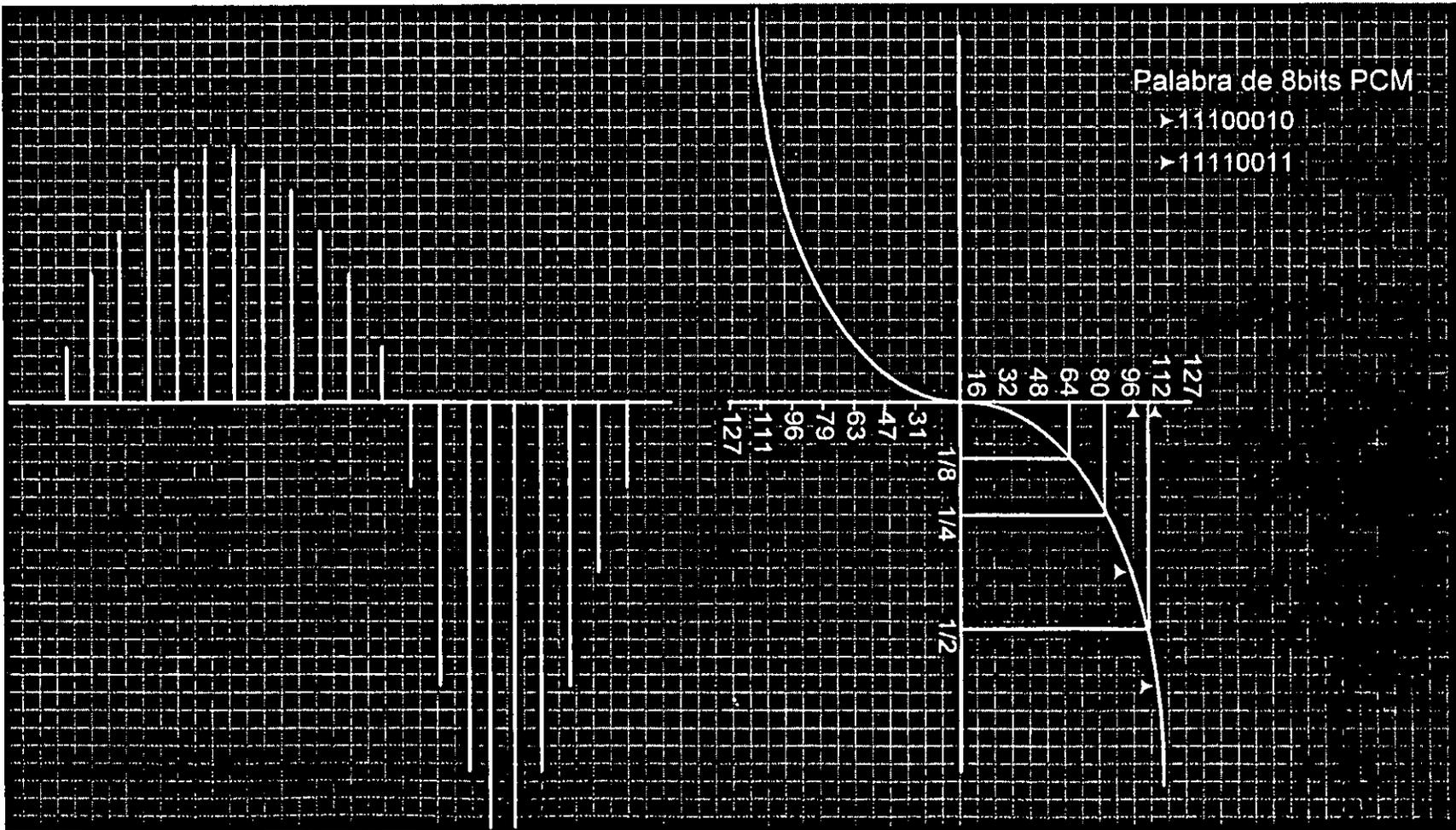
<i>System</i>	<i>TAT-8</i>	<i>TAT-10</i>	<i>TAT-12/13</i>
Date Operational	1988	1992	1995
Spans	Atlantic	Atlantic	Atlantic
Data rate	278 Mbit/s	565 Mbit/s	5 Gbit/s
Working Pairs	2	2	1
Repeater spacing	50 km	over 100 km	no repeaters
Wavelength	1300 nm	1550 nm	1550 nm
Technology	E-O repeater	E-O repeater	Optical amps



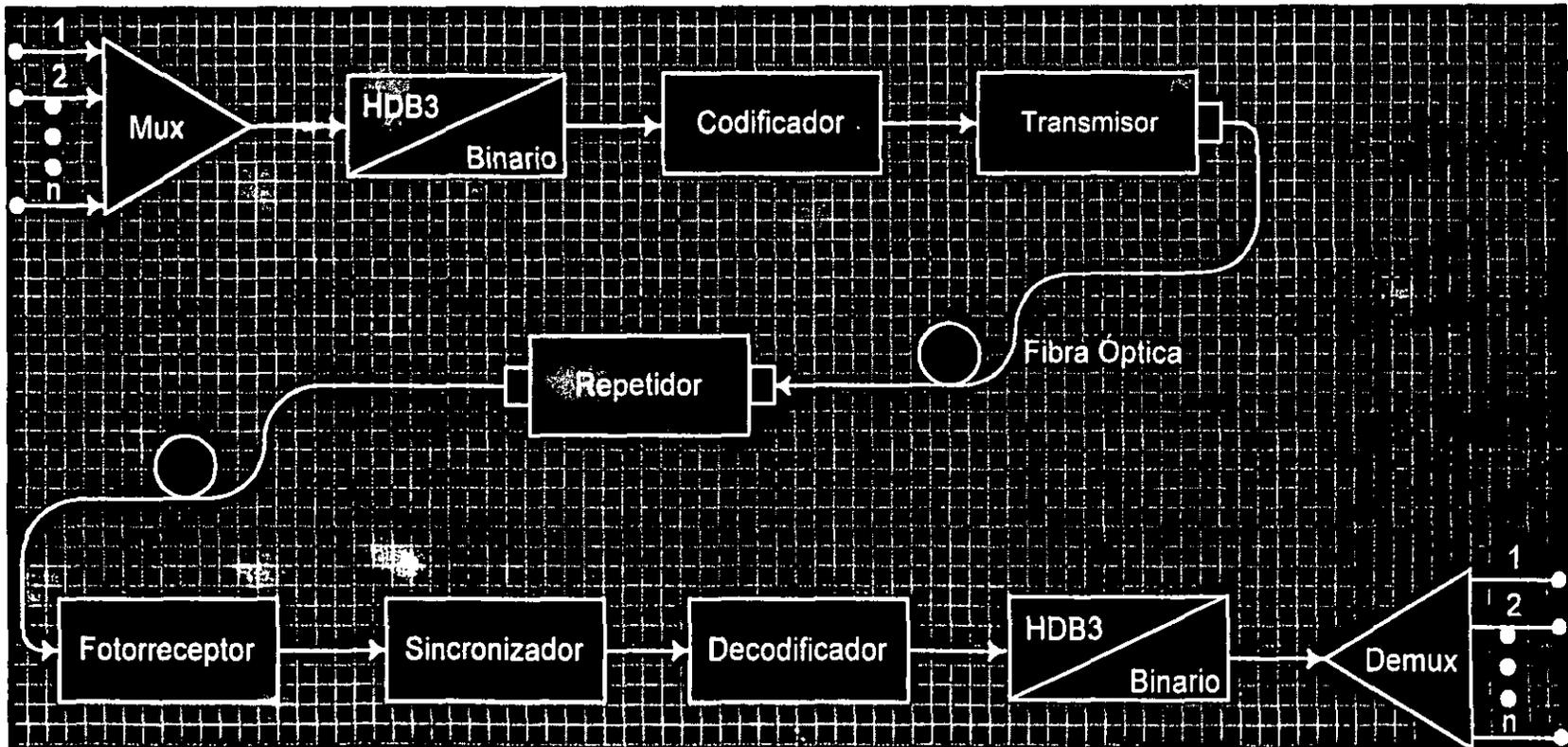
### Transmission rates in North America and Europe.

<i>Rate Name</i>	<i>Data Rate</i>	<i>Nominal Voice Circuits</i>
<i>North American Digital Hierarchy</i>		
single circuit	56,000 bit/s	1
T1 or DS1	1.5 Mbit/s	24
T2 or DS2	6.3 Mbit/s	96
T3 or DS3	45 Mbit/s	672
T3C or DS3C	90 Mbit/s	1344
T4 or DS4	274 Mbit/s	4032
400 Mbit/s	405 or 417 Mbit/s*	6048
565 Mbit/s	565 Mbit/s*	8064 (56 kbit/s equiv.)
810 Mbit/s	810 Mbit/s*	12,098
1700 Mbit/s	1700 Mbit/s*	24,192
2400 Mbit/s	2400 Mbit/s*	36,290
<i>European (CCITT standard)</i>		
single circuit	64,000 bit/s	1
Level 1	2.048 Mbit/s	30
Level 2	8.448 Mbit/s	120
Level 3	34.304 Mbit/s	480
Level 4	139.264 Mbit/s	1920
Level 5	565.148 Mbit/s	7680
<i>SONET/Synchronous Digital Hierarchy</i>		
STS-1/OC-1	51.84 Mbit/s	672 (28 DS1s or 1 DS3)
STS-3/OC-3(STM-1)	155.52 Mbit/s	2016
STS-12/OC-12(STM-4)	622.08 Mbit/s	8064
STS-48/OC-48(STM-16)	2488.32 Mbit/s	32,256
STS-96/OC-96(STM-32)	4976.64 Mbit/s	64,512
STS-192/OC-192(STM-64)	9953.28 Mbit/s	129,024
*Actual line rate depends on design and overhead bits and is not standardized.		

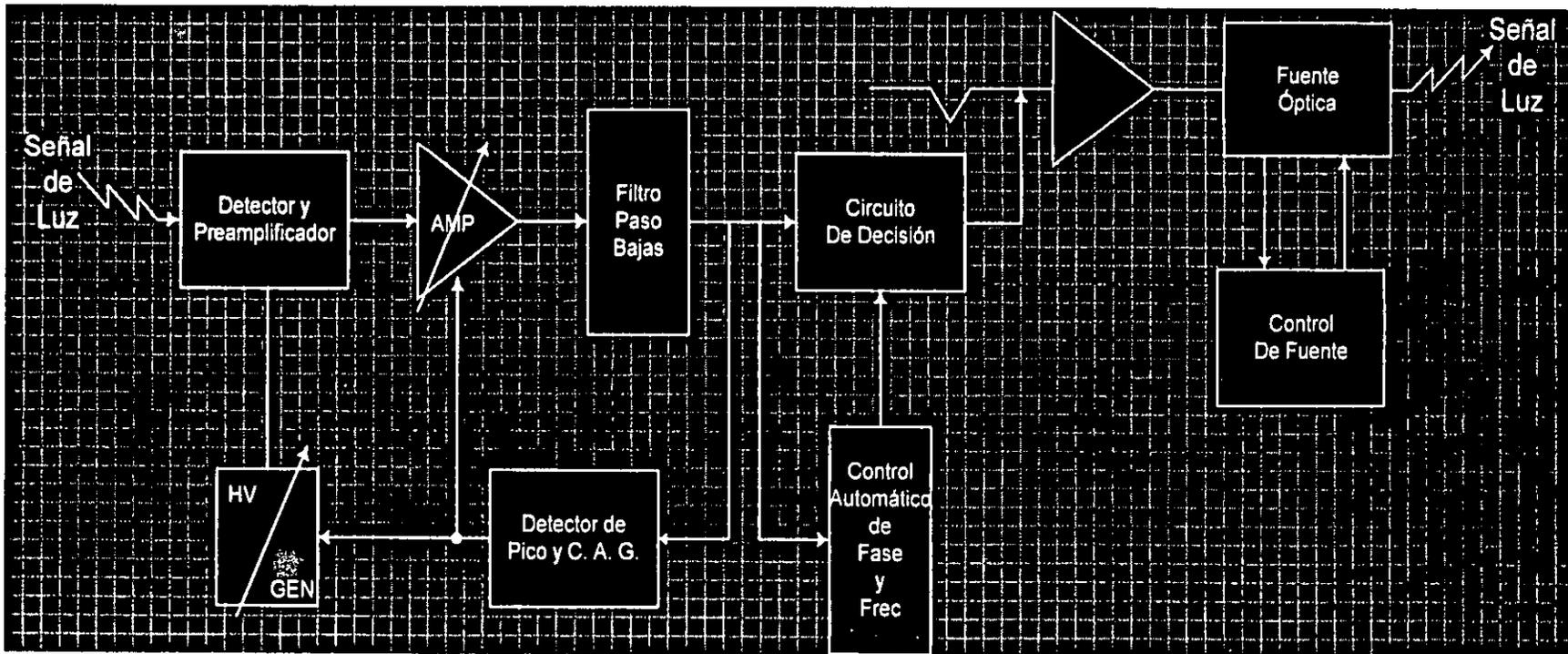
# *Cuantización y Codificación de acuerdo a la ley A*



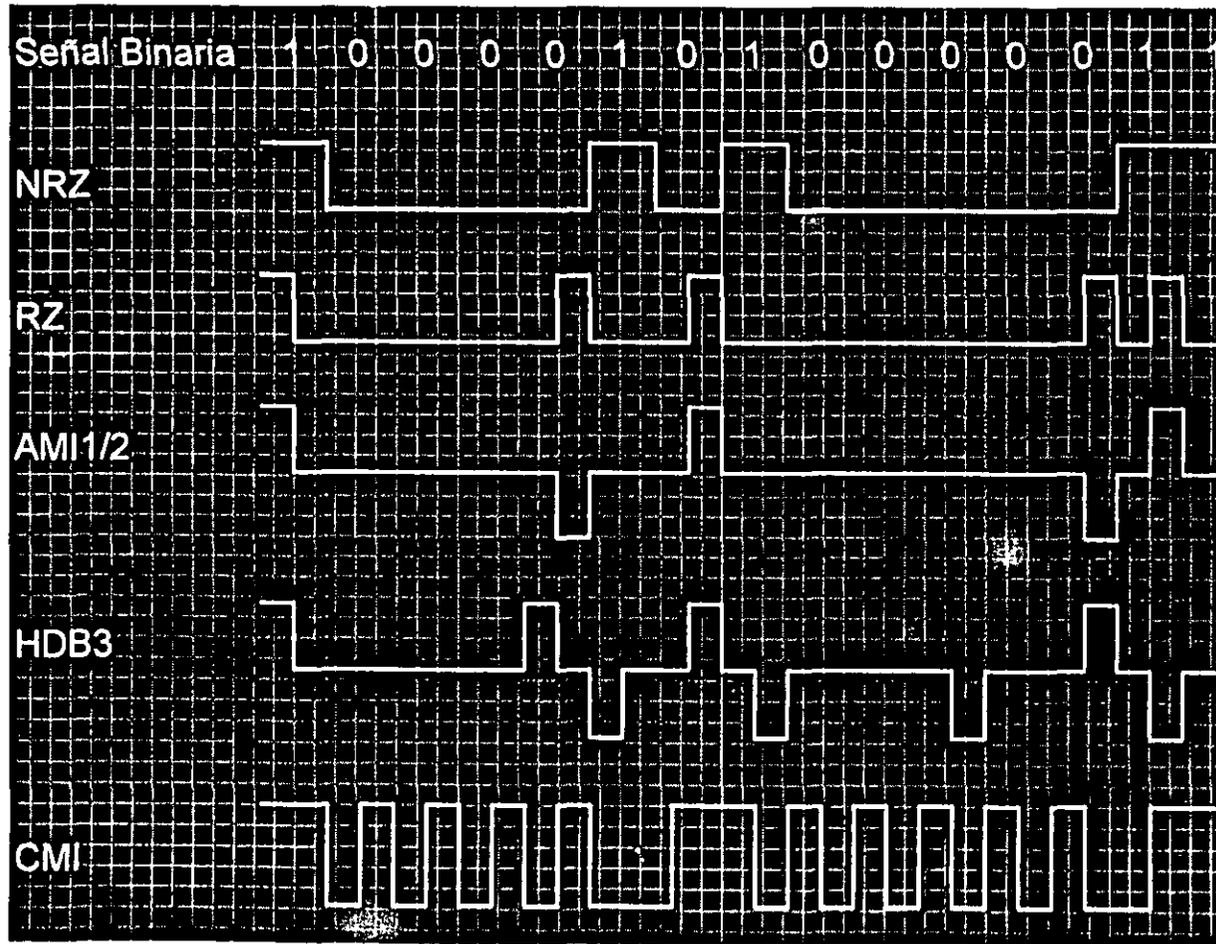
# *Equipo Terminal PCM*

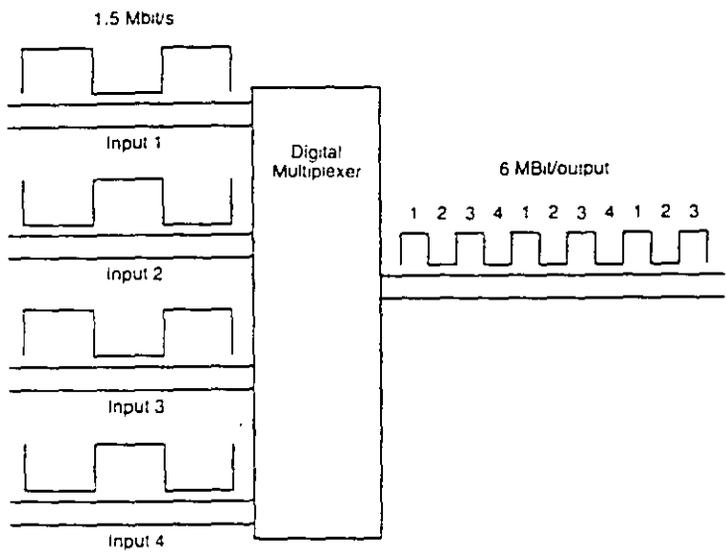


# Repetidor Óptico



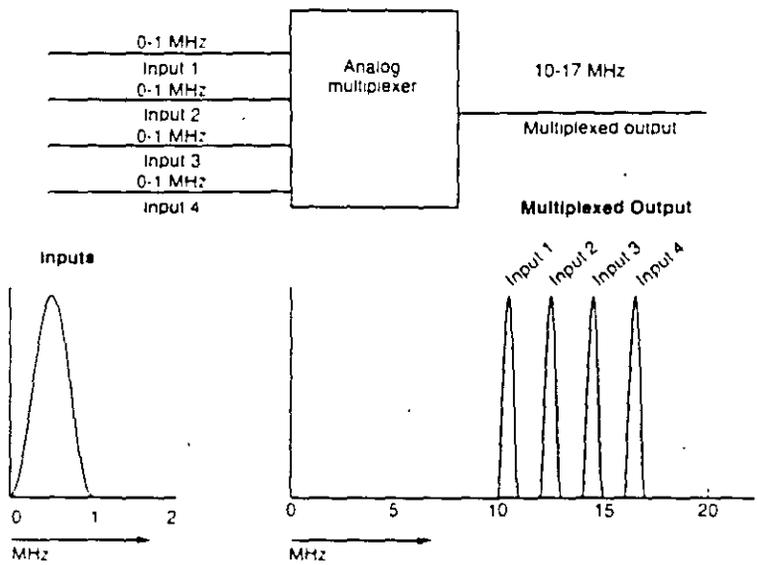
# *Ejemplos de códigos de línea*





*Time-division digital multiplexing*

*Analog electronic frequency-division multiplexing*



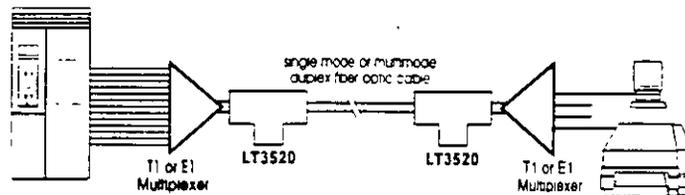


# LASCOMM

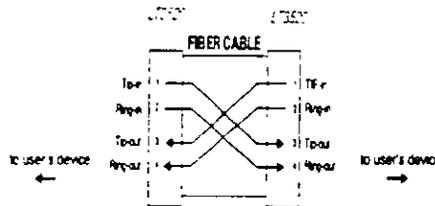
Fiber Optic Division

## MODEL LT1620

### T1/E1 Fiber Optic Modem



Typical Applications for LT3520



Pinouts

2009 Dewberry Court, Westlake Village, CA 91361-1810



Phone

805-496-8053



Fax

805-497-3606



Email

Lascomm

The LT620 is compatible with popular types and sizes of optic cable. Fiber optic connectors are ST; FC or SMA are optional. Special four-position and two-position feed-through detachable terminals are provided for connecting the T1/E1 twisted pairs. Input power is 12VDC or 115/230VAC with an external power cube.

### LT620 Specifications

Data Rates	T1	1.544 Mbps
	E1	2.048 Mbps
Optical	Transmitter	LED/ELED/Laser
	Receiver	PIN
	Wavelength	850nm / 1300nm multimode 1300nm single mode
Fiber Optic connectors *ST: (FC or SMA optional)		
Loss Budget	20 dB multimode	850nm/1300nm @62.5um
	18 dB single mode	1300nm @9 um
*contact factory for higher than 20 dB		
Electrical	Connector	Detachable Terminal Block
	Interface	T1/E1 (G. 703)
System	Bit error rate	1 in 10 <sup>9</sup> or better
	Visual indicators	"PWR"."SYNC"."LOS" "BPV"."ALARM"
Power	Power source	9 to 12 VDC @300ma
	optional	115 or 230 VAC with external power cube
Temperature	Operating	-10 C to 50 C
	Storage	-40 C to 90 C
	Humidity	95% non-condensing
Physical	Height	(2.80 cm) 1.125"
	Width	(12.75 cm) 5.0"
	Depth	(7.50 cm) 2.5"
	Weight	(275 gm) 10 oz

\* ST is a trademark of AT&T

---

## LASCOMM

2009 Dewberry Court, Westlake Village, CA 91361-1810

---



## MODEL LT1620

---

### T1/E1 Fiber Optic Modem Picture - or - Schematic

#### Features

- Provide Fiber Optic Link for T1 and E1 (G 703) Applications
- Built-In Elastic Buffer and Received Decoded T1/E1 Signal Retimed to Remove Jitter
- Supports AMI/BSZS/HDB3 Line Codes
- 20 dB Optic Loss Budget, Multimode or Single Mode Optional 25 dB & 30 dB available
- 14 dB of Line Return Loss
- Distances to T1 (DSX-1) Cross Connect Can Be 0 to 655 Feet
- Supports Local & Remote Loopback Test
- Small & Compact Anodized Aluminum Case
- 5 LED Indicators, to Ease Installation & Trouble-Shooting Process

#### Applications

- Link Channel
- Link PBXs
- Link Customer Premises equipment to CSU/DSU
- Link M13 to DSX-1 Cross Connect

#### Description

The model 3520 is a T1/E1 Fiber Optic modem that offers advanced features such as Jitter Removal and a replaceable Line interface Module. Because it is based on modern FPGA (field programmable gate array) technology, it offers extremely low current consumptions and higher reliability. Transparent to the framing format, the LT1620's T1/E1 interface shapes the transmit pulse to support CCITT G 703, or for connecting to DSX-1 cross connects for line distances from 0 to 655 feet. The internal elastic buffer removes jitter from transmit data. The LT1620 has five LED indicators to ease installation and trouble shooting-one each for Power, Alarm, T1/E1 Signal Loss, BPV violations and Sync Active. It provides 8 DIP switches, accessible from the panel, to control settings for line code, line length, local loopback or remote loopback setting such as when the line code does not match the line length setting. The intelligent line code setting switch will eliminate any confusion.



## MODEL LT1680

---

### T3/E3 Fiber Optic Modem

#### Features

- Compliant with ANSI T1.102-1987, TR-TSY-000499 and CCITT G.703
- Coax input port Receive Equalizer
- Selectable transmit line buildout (LBO) to accommodate shorter line lengths
- Low jitter with receive signals retiming at both fiber and coax port
- Offers laser transmitter an option for fiber optic interface
- Built-in self and link tests for diagnostic LED indicators on the front panel

#### Applications

- Replaces coaxial cables with fiber optic link
- Extends T3-3 distance up to 30km
- High Interference Environments

#### Description

The LT1680, T3/E3 Fiber Optic Modem provides a point to point high speed data link between two DS-3 conforming devices. The distance between adapters can be extended up to 30 km with a laser transmitter option. The T3/E3 LT1680 adapter is especially valuable for extending your DS-3 circuits to another building on the premises.

Besides distance, a fiber optic link offers more advantages than coax for DS-3 data. A fiber cable has the characteristics of high bandwidth, low loss, less signal distortion, and high noise immunity. It can provide user with a clean, secure link and helps eliminate problems associated with coax cable such as noise, crosstalk and power surges.

The LT1680 also is a repeater for DS-3 data. Signals received from both fiber and coax port inputs are re-timed and reconstructed to reduce jitter and distortion.

### LT1680 Specifications

Data Rates	T3	44.766 Mbps
	E3	34.368 Mbps
Optical	Transmitter	LED/ELED/Laser
	Receiver	PIN
	Wavelength	850nm / 1300nm multimode 1300nm single mode
Fiber Optic connectors *ST: (FC or SMA optional)		
Loss Budget	15 dB multimode	850nm/1300nm @62.5um
	15 dB single mode	1300nm @9 um
*contact factory for higher than 15 dB requirements		
Electrical	Connector	BNC/Coaxial
	Interface	T3/E3
System	Bit error rate	1 in 10X9 or better
Power	Power source	9 to 12 VDC @120ma typical
	optional:	115 or 230 VAC with external power cube
Temperature	Operating	-10 C to 50 C
	Storage	-40 C to 90 C
	Humidity	95% non-condensing
Physical	Height	(7.0 cm) 2.75"
	Width	(18.4 cm) 7.25"
	Depth	(16.5 cm) 2.5"
	Weight	(700 gm) 1.5 lb

\* ST is a trademark of AT&T

---

## LASCOMM

2009 Dewberry Court, Westlake Village, CA 91361-1810

---



Phone  
805-496-8053



Fax  
805-497-3606



Email  
*Lascomm*

Return to Top of Page

Go to Table of Contents.

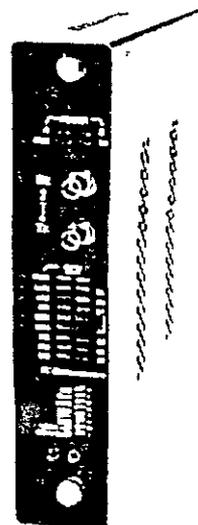
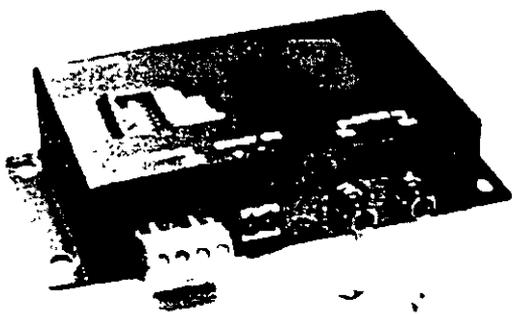


# LASCOMM

Fiber Optic Division

## MODEL LT1620

### T1/E1 Fiber Optic Modem



Stand-alone Unit ----- Rack Mount Unit

# LASCOMM

2009 Dewberry Court, Westlake Village, CA 91361-1810



Phone

805-496-8053



Fax

805-497-3606



Email

[Lascomm](mailto:Lascomm)

## Welcome to the Project OXYGEN Network web site!

The Project OXYGEN Network is the world's first truly global undersea optical fiber communications network. Its innovative design has moved the industry from the concept of point-to-point communications cables to that of ubiquitous, worldwide networks. Project OXYGEN was created by Neil Tagare to meet the changing needs of the marketplace, in particular the prominence of the internet and related applications.

The OXYGEN Network is backed by some of the leading names in the industry. Bechtel Corporation is OXYGEN's project manager, and Lenman Brothers serves as its financial advisor.

The Project OXYGEN Network offers you leading edge technology that will never become obsolete and the capacity to meet the demands of today's information-hungry population. It features 2.56 terabits of capacity. In addition, OXYGEN offers true global flexibility with bandwidth on demand, and pricing based solely on the amount of capacity purchased. A number of purchasing options, such as shore-to-shore and city-to-city, are available.

This web site has been designed to provide you with up-to-date information on Project OXYGEN. Thank you for your interest in our Network.

[HOME](#)

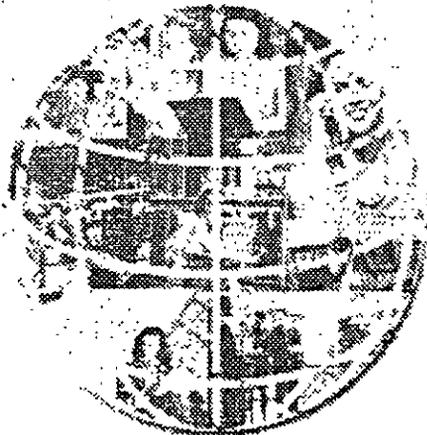
© 1999 - 2000 Project OXYGEN - All Rights Reserved

Systemtech

## About Us

Project OXYGEN Network is a planned global undersea optical fiber cable network comprising 169,000 kilometers, with landings in major countries around the world. It offers capacity of 2.55 Terabits on transoceanic segments.

It was created to serve the changing needs of the communications marketplace, in particular to meet the needs of Internet users and e-communicators. These data-dominated means of communicating are fueling unprecedented growth in international telecommunications traffic. Only an infrastructure development with the size and flexibility of Project OXYGEN can be expected to fill the huge and unpredictable need for capacity.



### Global Telecommunications - A Changing Scene

Just a few years ago, the vast majority of international telecommunications traffic consisted of voice calls. Data represented a small fraction of international telecommunications traffic, typically about 10 percent.

Today, that has changed. While the rate of growth of voice and fax traffic is fairly predictable - 10 to 15 percent yearly - the rate of growth for data has risen exponentially. The compounded annual growth rate of Internet and e-traffic was 87% for the five years between 1993 and 1998.

By 2002, it is predicted that voice will represent only 10 percent of total international traffic. Because of this, the consortium method of planning and building cables is no longer an ideal business model. The point-to-point nature of

### The OXYGEN Network - Designed To Respond To The New Requirements

Project Oxygen is the first truly global undersea fiber cable network to be designed for a data-dominated world. It offers such features as portable bandwidth, made possible by OXYGEN's ubiquitous network and switching capability. It also leads the industry in establishing a new pricing model - the purchase of circuits on a unilateral basis, with pricing based solely on the amount of capacity bought.

Traditional systems do not usually include switching capability within their design, except where needed to provide restoration. OXYGEN Network includes high-speed, combined ATM/SDH switching within the network design. These switches will be used to provide the flexibility that is being demanded by carriers to meet their rapidly changing traffic requirements. Using the Lucent Bandwidth Manager platform will provide the network with the capability to carry any type of voice and data traffic. Carriers will be able to use the network to transport PDH, SDH, ATM and IP traffic between any points on the network. Additionally, the network will provide broadcast capabilities, not available on today's point-to-point international cable network.

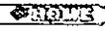
The OXYGEN Network will also have its own network management system. This will include three Network Management Centers, which are geographically separated. This network management system, working in conjunction with the Bandwidth Manager switches, will be the engine that provides unprecedented flexibility to carriers using the OXYGEN Network for their future needs.



today's network means that provisioning long distance circuits is time consuming, labor intensive and expensive. For example, a carrier needing connectivity from India to the United States, has to obtain capacity on several cable systems and negotiate transits through each country. These multi-country, end-to-end links are also difficult to change.

#### **OXYGEN Is A Highly Reliable Network**

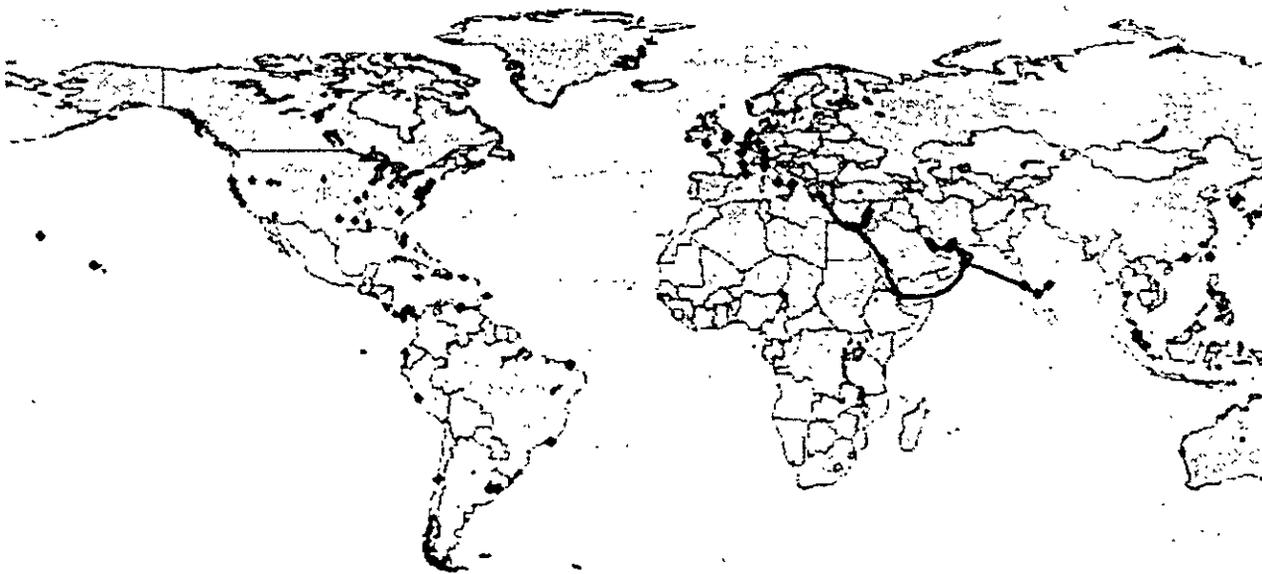
A network like OXYGEN need to be highly reliable to provide carriers with the availability they need to be able to provide consistently high grades of service to their customers. This reliability is achieved through the use of SDH ring Versana, which enables traffic to be restored automatically, within 300 milliseconds, in the event of a fault anywhere in the ring. In the highly unlikely event that the SDH ring restoration is not able to restore traffic, for example because of multiple faults within the same ring, the Management Centers will be able to see and manage all the surviving network resources. This will enable the Management Centers to deal effectively with any type of fault condition on the network. This gives OXYGEN Network a significant advantage over the traditional cable systems, which do not have unified management of all the available resources.



© 1999 - 2000 Project OXYGEN - All Rights Reserved

System

## Project Oxygen™ Network



Phase 1



Expansion Plans Under Evaluation

Phase 2



© 2000 Project Oxygen Ltd. All rights reserved.

© 2000 Project Oxygen Ltd. All rights reserved.

System.

The screenshot shows the Project OXYGEN website interface. At the top, there is a navigation menu with links: About Us, Home, Landing Points, Senior Executives, Purchase Capacity, Sales Offices, Job Opportunities, Meetings & Events, F.A.Q.s, News & Announcements, Press Room, Oxygen in the Room, and Members. The main heading is "Project Oxygen Network Access Points" with a sub-note "(Current as of February 16, 2000; subject to change)". Below this is a link to "Project OXYGEN™ World Map (Map)" and a brief description: "This illustrates the current view of the composition of the various phases of the Network." The core content is a "List of Network Access Points" presented in two columns of bulleted items. At the bottom right of the page content, there is a "HOME" button.

## Project Oxygen Network Access Points

(Current as of February 16, 2000; subject to change)

[Project OXYGEN™ World Map \(Map\)](#)  
This illustrates the current view of the composition of the various phases of the Network.

### List of Network Access Points

- o Argentina, Buenos Aires
- o Bahrain, Al Manamah
- o Belgium, Brussels
- o Brazil, Rio de Janeiro
- o Brazil, Fortaleza
- o Cape Verde, Sao Tiago
- o Chile, Santiago
- o China, Hong Kong
- o China, Shanghai
- o Colombia, Bogota
- o Cyprus, Yeroskipos
- o Ecuador, Quito
- o Egypt, Cairo
- o France, Paris
- o France, Marseilles
- o Germany, Dusseldorf
- o Germany, Frankfurt
- o Germany, Stuttgart
- o Greece, Athens
- o Guam, Agat
- o India, Bangalore
- o India, Chennai
- o India, Mumbai
- o Israel, Tel-Aviv
- o Israel, Nahariya
- o Israel, South Ashkelon
- o Italy, Rome
- o Japan, Tokyo
- o Korea, Seoul
- o Malaysia, Kuala Lumpur
- o Midway, Midway Island
- o Netherlands, Amsterdam
- o Oman, Muscat
- o Peru, Lima
- o Philippines, Manila
- o Qatar, Doha
- o Saudi Arabia, Jeddah
- o Singapore, Singapore
- o Spain, Barcelona
- o Spain, Madrid
- o Switzerland, Geneva
- o Switzerland, Zurich
- o Taiwan, Kaohsiung
- o Thailand, Bangkok
- o UAE, Fujairah
- o UK, London
- o USA, Chicago
- o USA, Dallas
- o USA, Honolulu
- o USA, Los Angeles
- o USA, Miami
- o USA, New York
- o USA, Philadelphia
- o USA, San Francisco
- o USA, Washington
- o Venezuela, Caracas

HOME

## Media Backgrounder - Project OXYGEN™ Network

Project OXYGEN™ is a global optical fiber undersea cable network that will connect every continent except Antarctica. It was originally planned to span roughly 300,000 km and link 265 landing points in 171 countries and locations as a single project. These original numbers are no longer current. OXYGEN Network now is being implemented in phases. The first phase will see rapid construction of a 169,000-km backbone network on the most heavily trafficked international routes, while the second phase will increase regional connectivity to the core network.

CTR Group, Ltd. of Woodcliff Lake, New Jersey USA, created and launched Project OXYGEN. CTR was founded by Neil Tagare, who played a key role in the creation and implementation of the FLAG (Fiberoptic Link Around the Globe) project, an undersea cable stretching from Europe through the Middle East and Southeast Asia to Japan. A new company called Project Oxygen Ltd. will build and operate the OXYGEN Network.

### Network vs. Point to Point

Until Project OXYGEN, all undersea cable systems have used a point-to-point approach - i.e., they connected two distinct end-points, sometimes with intermediate drop-offs along the way. International carriers who wanted to send their traffic to other parts of the globe over such cables had to buy or lease separate circuits for every segment along the way. To send calls from North America to Indonesia, a carrier would have to purchase capacity on several different cable systems - from North America to Japan, for example, then from Japan to Singapore and Singapore to Indonesia.

The traditional point-to-point approach necessitates separate negotiations and deals for capacity on each of the segments and cables involved, and requires significant investments of time, personnel, and money. Sending traffic to a distant destination over such routes also requires payment of transit fees to a local carrier every time the traffic moves from one cable to the next. And it forces carriers to predict years in advance the destinations and volume of their traffic, since fixed circuits are traditionally purchased for 25-year usage.

Project OXYGEN, by contrast, is a network. Customers who purchase OXYGEN Network access can send their traffic from any landing points on the network to any others, with no difference in cost. They can also change the points between which they send their traffic, and the amount they send, at will. Thus Project OXYGEN brings the distance- and destination-independent pricing mode of the internet to international telecommunications.

### Phased Construction

Of the 169,000 km of cable making up the first phase of Project OXYGEN, more than 155,000 km will be undersea, with the rest terrestrial. The first phase will be built in parts. A greater Atlantic ring, Phase 1A1, will be completed by June of 2001. Phase 1A2, comprising major trans-Pacific and Southeast Asia rings, will be completed by December 2001. A terrestrial link across North America, a Mediterranean ring, and another trans-Atlantic link, together making up Phase 1B, will be completed by May 2002. Phase 1C, adding Northern Europe, Middle East, and South American rings, and an India-Thailand link, will be completed by December 2002. A Central America link, an Oceania ring, and additional Atlantic and Pacific links, collectively forming Phase 1D, will be in service by August 2003, completing the first phase. The subsequent completion of the second phase will result in a system of approximately the same size and geographical coverage as originally announced for the full OXYGEN Network.

## News Release

### Important Media Advisory on Project OXYGEN Network

TO: All journalists covering Project OXYGEN™ Network  
RE: Change Of Configuration And Business Model  
DATE: July 8, 1998

There has been some confusion about the cost and configuration of Project OXYGEN. The following points are to help clarify the current status of the project.

1. The original plan for Project OXYGEN, announced in June, 1997, called for a network around 275,000 km in length (later increased to 325,000 km), with 265 landing points in 171 countries and locations. Cost was projected to be US\$14.7 billion, with completion scheduled for 2003. **THESE NUMBERS ARE NO LONGER CURRENT (SEE BELOW).**
2. In April, 1998, we announced that the project would be accelerated, in response to numerous requests to bring bandwidth on-line faster than originally planned. The acceleration changed the project cost, configuration and timeline as follows:
  - a. The project will now be constructed in two phases. Phase 1 will cost more than US\$10 billion, and consist of 169,000 km of cable, with more than 165,000 km undersea and the rest terrestrial. It will have 97 landing points in 76 countries and locations. Capacity on any undersea cable segment will be up to 2.56 Tbit/s.
  - b. The major trans-Atlantic and trans-Pacific links of Phase 1 will be in place in 2001, and Phase 1 will be complete in mid-2003.
  - c. Construction of Phase 2 will begin after Phase 1 is finished. Cost and configuration of this phase will be announced later.

For more information, contact:

Barbara Wright  
Phone: +1 201-505-9030 Ext. 8080 Fax: +1 201-505-9033  
Email: [wright@oxgroup.com](mailto:wright@oxgroup.com)  
Web site: <http://www.projectoxygen.com>

points on the system (a full circuit would require having access capacity at both landing points). A fixed point-to-point STM-1 full circuit on various existing and planned trans-Atlantic or trans-Pacific cables ranges from US\$3.9 million to US\$22.8 million.

#### Construction and Maintenance

Project OXYGEN Network will be built and installed under a supply contract between Project Oxygen Ltd. and selected suppliers. The contract will be signed at financial closing, and cable installation will begin in late 1999. Landing stations will be built by landing parties in each country and location. Project Oxygen Ltd. will provide financing for the construction of these landing stations where requested.

A Project Oxygen Ltd. subsidiary, Project Ozone Ltd., will provide maintenance and repair of the OXYGEN Network. Customers will pay an annual fee equal to 6 percent of the cost of the capacity they purchased. This fee is a guaranteed fixed cost that shifts the risk of operations and maintenance (O&M) from the carrier to the service provider.

An affiliated company, CTR Telecities, will build and operate buildings suitable for housing both Project OXYGEN terminal equipment (ATM switches, optical cross connects, transmission equipment, etc.) and other electronic equipment used by commercial service providers.

Startup funding for the project is being provided by the following companies: Tyco Submarine Systems, Ltd., Corning Incorporated, and Lucent Technologies of the United States; Alcatel Submarine Networks of France; and NEC Corporation, NTT International Corporation, Sumitomo Corporation, and Mitsui & Co., Ltd. of Japan. These companies are not equity owners of either CTR Group or Project Oxygen Ltd.; their funding provides them with the opportunity to supply the equipment that will make up the OXYGEN Network. Lehman Brothers serves as financial advisor for Project OXYGEN.

© 1999

© 1999 - 2000 Project OXYGEN - All Rights Reserved

System

Project OXYGEN Network will be based on ATM and optical switching and SDH transmission. The ATM switches, located in the terminal stations at the 97 landing points, will accept all inbound ITU-standardized digital traffic from the domestic network. Customers will provide the interface cards that will feed their traffic into the ATM switches. Network management centers (NMCs) in the U.K., the U.S. and Singapore will jointly oversee and operate the network, and an engineering support center (ESC) will provide technical assistance and training as needed for operating, modifying, and upgrading the network.

The cables that make up OXYGEN Network will contain up to eight fiber pairs on long haul (at least 350 km) undersea segments, which require optical amplifiers, and 12 fiber pairs on terrestrial and shorter submarine segments. Use of dense wavelength division multiplexing (DWDM) technology will allow each fiber pair to carry 32 frequencies or "colors" of light, each frequency transporting 10 Gbit/s of data, for a total capacity of 320 Gbit/s per fiber pair. Thus throughput on undersea cable links will be as much as 2,560 Gbit/s on any cable segment.

**Capacity Purchase**

Originally planned as a consortium or "club" cable, Project OXYGEN is now structured as a private system. Under a consortium model, telecom carriers would provide the construction financing, and would be both the joint owners and users/sellers of access capacity on the system. As a private system, Project OXYGEN will be financed both by carriers purchasing access capacity and private lenders and investors providing debt and equity. The unsubscribed capacity will be sold to service the debt and provide returns to the equity investors.

The financial closing - the date when the contract to proceed with the construction of Project OXYGEN, which is the equivalent of the Construction and Maintenance Agreement of a consortium cable - is scheduled for the second quarter of 1999. Before that date, customers will be able to buy access capacity on Project OXYGEN directly at fixed prices. Afterwards, they will have to buy from the owners/investors at market rates.

Fixed-price customers buy Project OXYGEN capacity on an Access-Bandwidth basis. Specifically, they pay a certain amount for a certain level of Access Bandwidth to the network, i.e. for a certain size input port or ports. There are four pricing levels for buying capacity on Project OXYGEN Network, as follows:

Price (US\$ million)	Access Bandwidth (Gbit/s)
200	100
100	32
50	10
10	1.24

Under this arrangement, a carrier that pays US\$200 million can put 100 Gbit/s of traffic onto the network through any landing point or points, and can buy additional capacity in US\$10 million increments. It can divide this access capacity among any number of landing points in any locations on the network. It can change the landing points it uses, and the amount of traffic it puts through each of them, at will. This allows it, by allocating its access capacity to two locations, to create and operate full circuits. It can also resell the capacity to other customers without restriction.

After Project Oxygen Ltd. sells capacity equal to the development cost of the Network, estimated to be in excess of US\$10 billion, 20 percent of all revenues from additional sales will be rebated to customers who have bought Access Bandwidth prior to financial closing, until they have received back 100 percent of their bandwidth purchase price.

Although the price per gigabit per second of capacity on Project OXYGEN varies according to the access level purchased, even the most expensive level is considerably cheaper than for capacity on other cables. The equivalent of an STM-1 (155 Mbit/s) full circuit on OXYGEN Network would cost US\$2.5 million at most, and could be used between any two landing