



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.

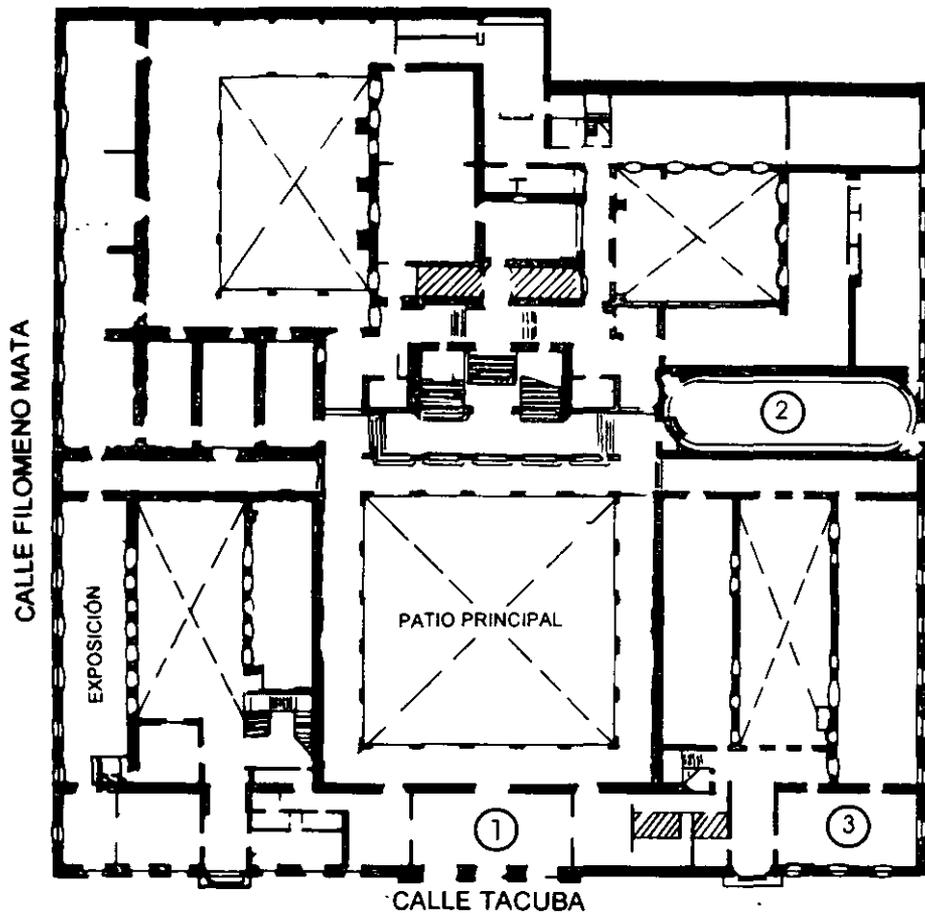
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

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.

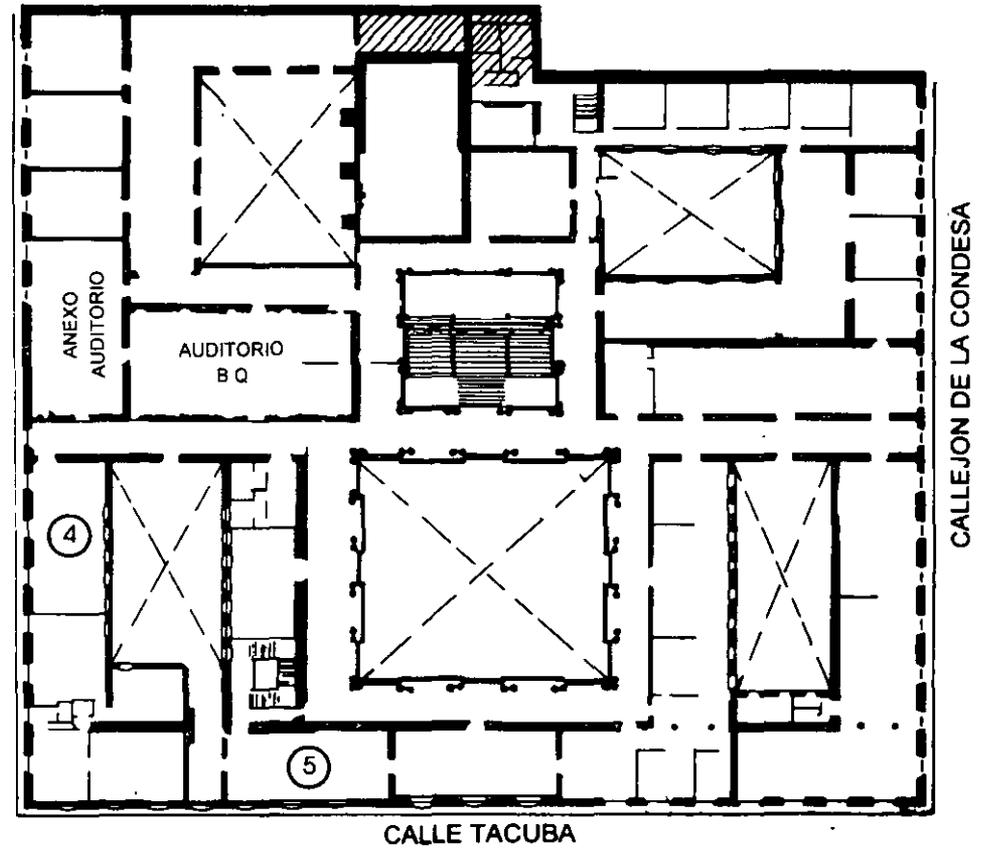
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA

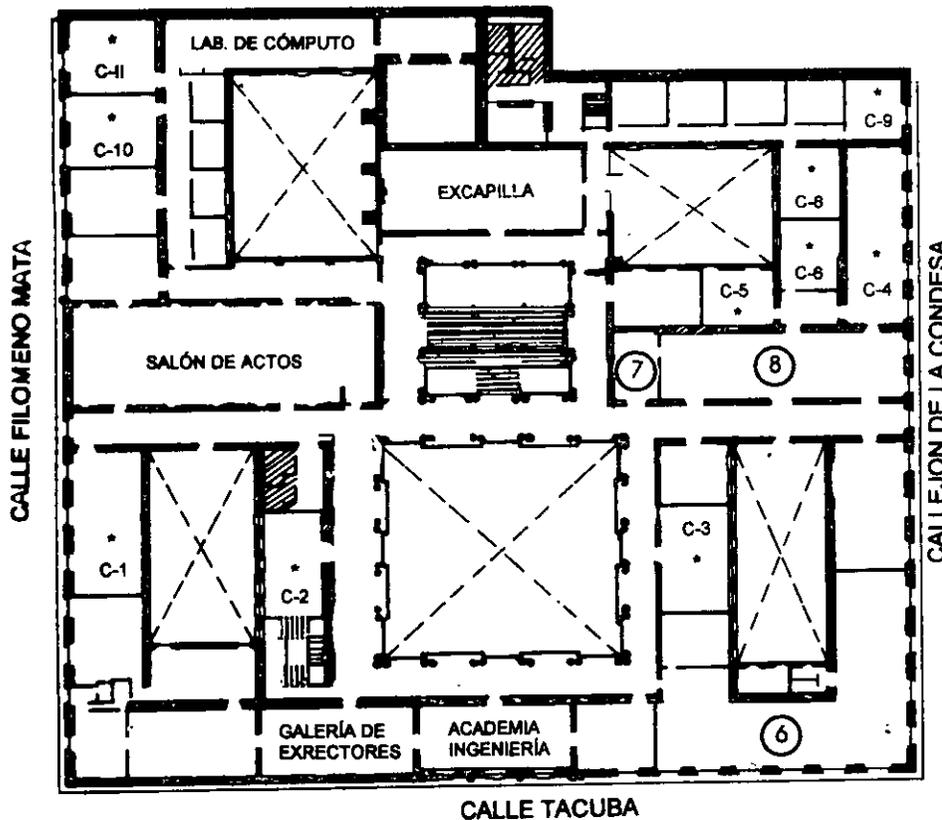


PLANTA BAJA



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

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

PROPAGACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS

**EXPOSITOR: DR. FERNANDO MARTÍNEZ P.
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**



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 μ 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 μ 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 μ 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 μ 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 médica, 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.

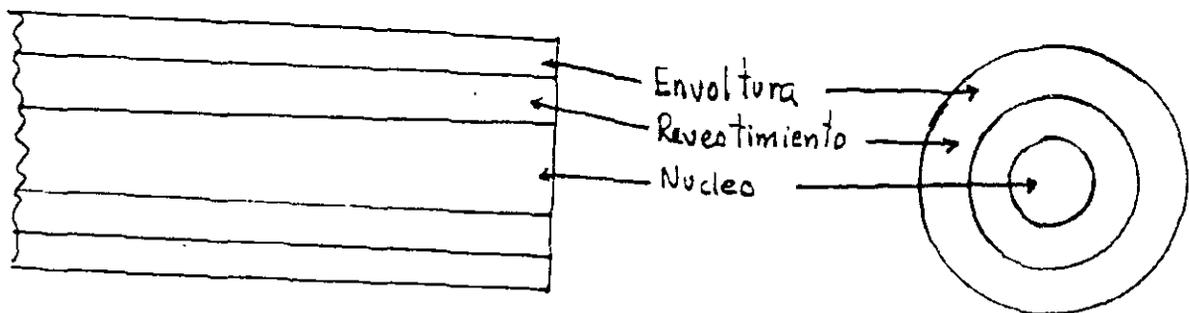


Fig. 1.- Estructura física de una fibra óptica.

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

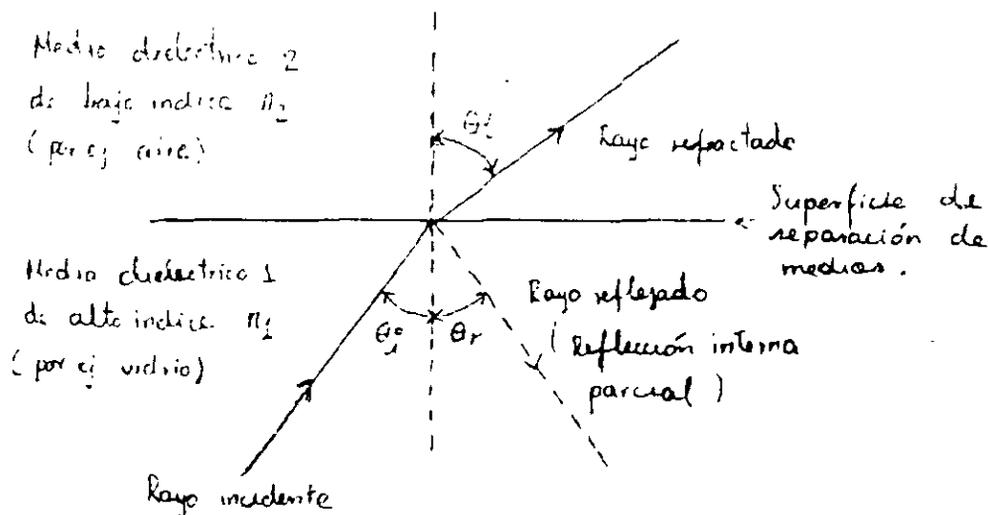


Fig. 2.2 - Refracción de rayos de luz que inciden en una interfaz de un medio de alto índice de refracción a uno de bajo índice de refracción, (por. ej. vidrio - aire).



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

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Si el dieléctrico en el otro lado de la interfaz tiene un índice de refracción n_2 que es menor que n_1 entonces: θ_r es mayor que θ_i (Un índice de refracción n_2 mayor que n_1 implicaría que θ_r sería menor que θ_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° y el rayo refractado emerge paralelo a la interfaz entre los dieléctricos el ángulo de incidencia debe ser menor que 90° . Este es el caso límite de refracción y el ángulo de incidencia se conoce como ángulo crítico θ_c como se muestra en la Fig. 3

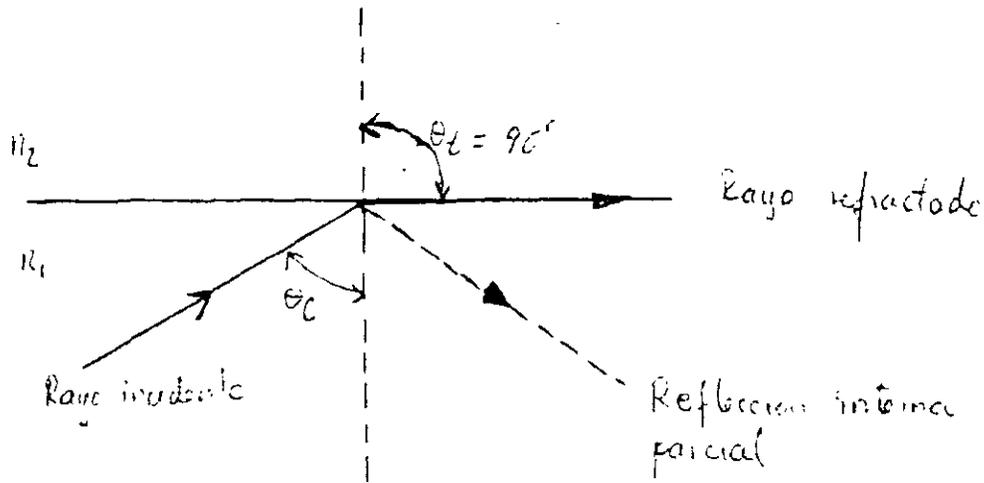


Fig. 3.- Caso límite de refracción que muestra el rayo de incidencia el ángulo crítico θ_c .

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

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{4}$$

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.

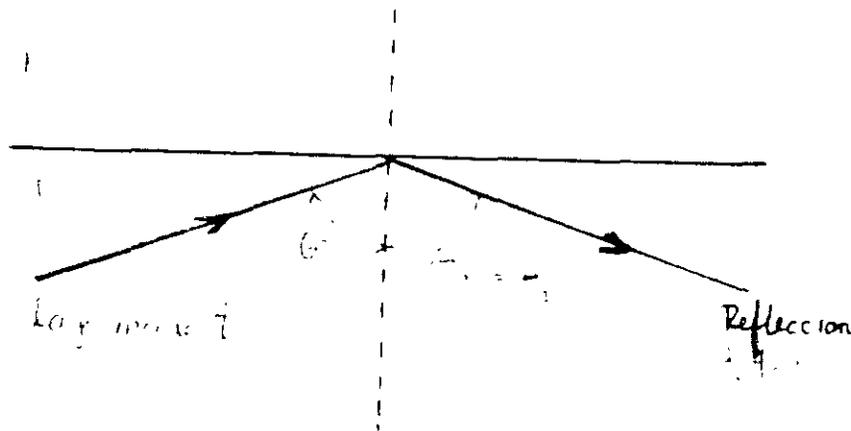


Figura 4.- Reflexión interna total cuando $\theta_i > \theta_c$



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.

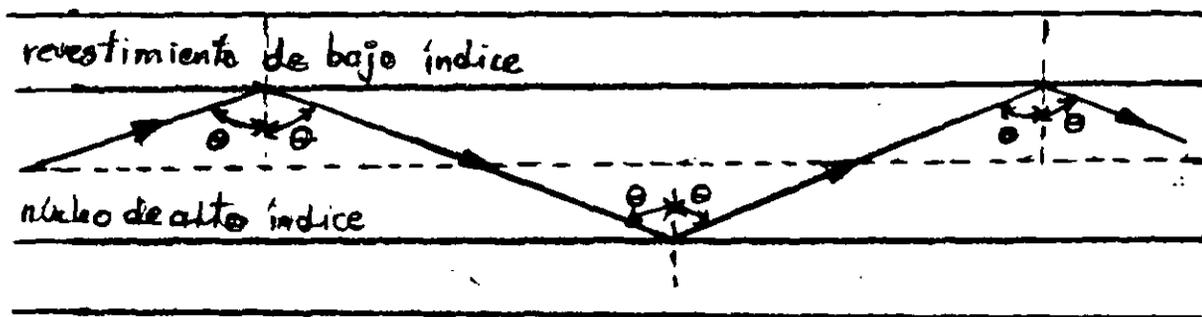


Fig.5 Transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal.

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 θ_c dentro de la fibra en la interfaz núcleo - revestimiento. Este rayo ingresa a núcleo de la fibra con un ángulo θ_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.

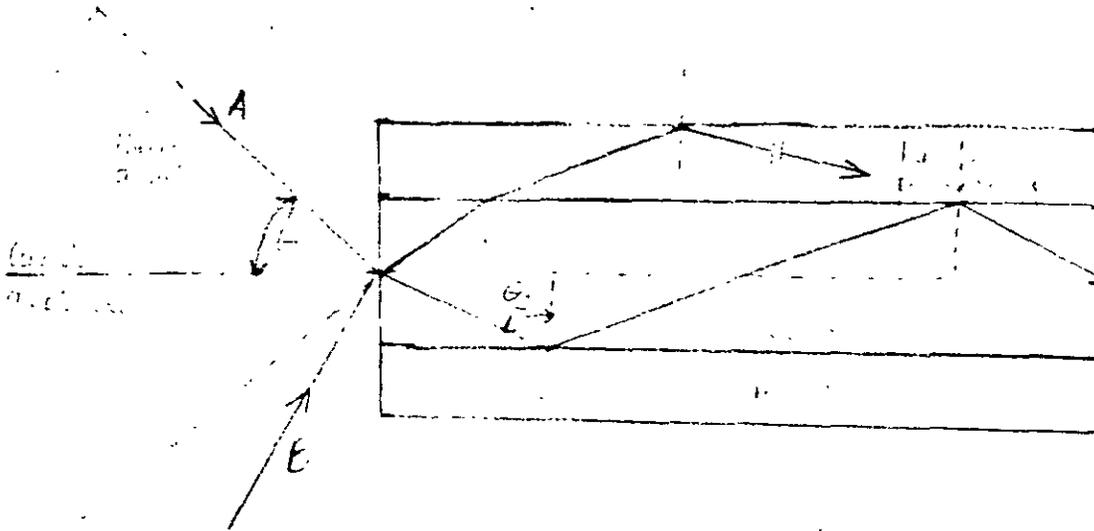


Fig. 6.- Angulo de aceptancia.

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 θ_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 aceptancia definido por el ángulo cónico medio θ_a o ángulo de aceptancia total.

A continuación se obtiene la relación entre el ángulo de aceptancia 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 θ_1 con respecto al eje de la fibra y que es menor que el ángulo de aceptancia θ_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 .

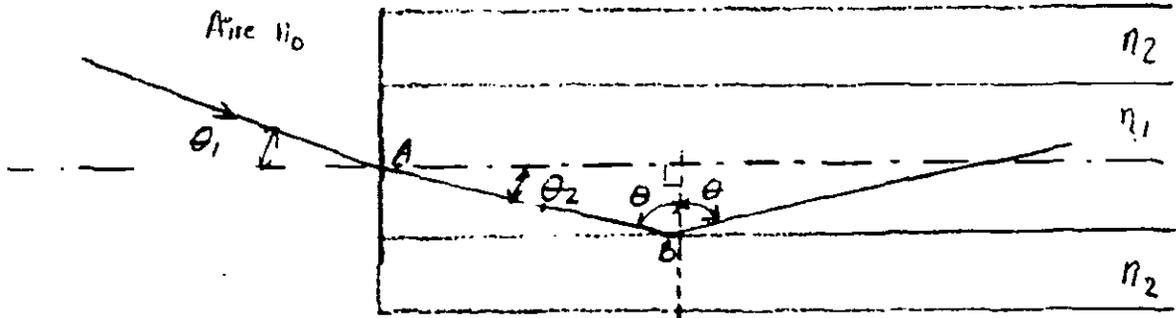


Fig. 7.- Trayectoria de un rayo meridional acoplado a una fibra óptica con un ángulo menor al ángulo de aceptación de la fibra.

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:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \quad (5)$$

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

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

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

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 Δ 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 θ_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 2γ en cada reflexión, γ 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.

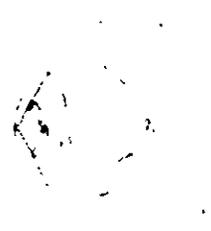
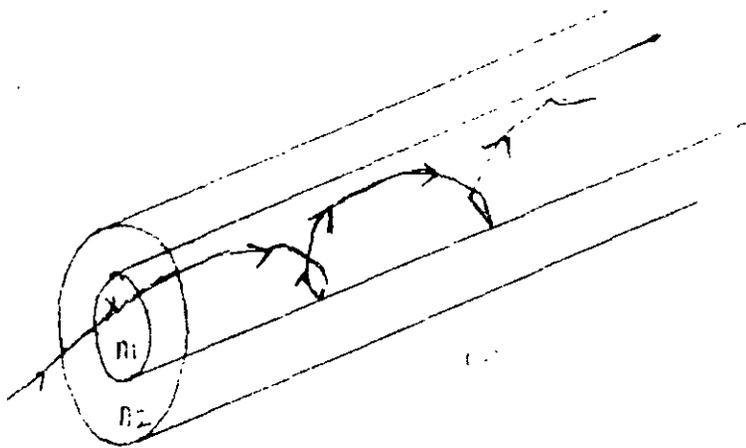


Figura 8.- (a) Trayectoria helicoidal seguida por un rayo oblicuo en una fibra óptica; (b) vista transversal de la fibra.

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, ϕ , 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:

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



donde ψ 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 λ 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.

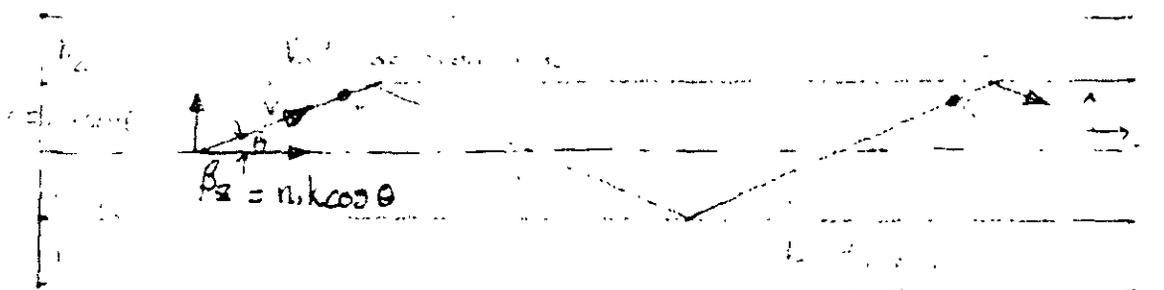


Figura 9.- Propagación de una onda plana en una guía. El vector de onda corresponde a un rayo equivalente.

El índice de refracción en la guía es n_1 , la longitud de onda óptica se reduce a λ/n mientras que la constante de propagación se incrementa a $n_1 k$. θ 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 β_z esta dada por:

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

La componente de la constante de propagación en la dirección x β_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 θ .

Los modos de propagación tienen una dependencia de la forma $\exp(-j\beta_z z)$ donde β_z es la constante de propagación. Por simplicidad $\beta_z = \beta$. Si suponemos una dependencia temporal para el campo electromagnético con frecuencia angular ω 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 dirección de propagación, pero $H_z = 0$, los modos así formados se llaman transversales magnéticos (TM).

Los números de modos se incorporan en esta nomenclatura refiriéndonos a los modos como TE_m y TM_m .

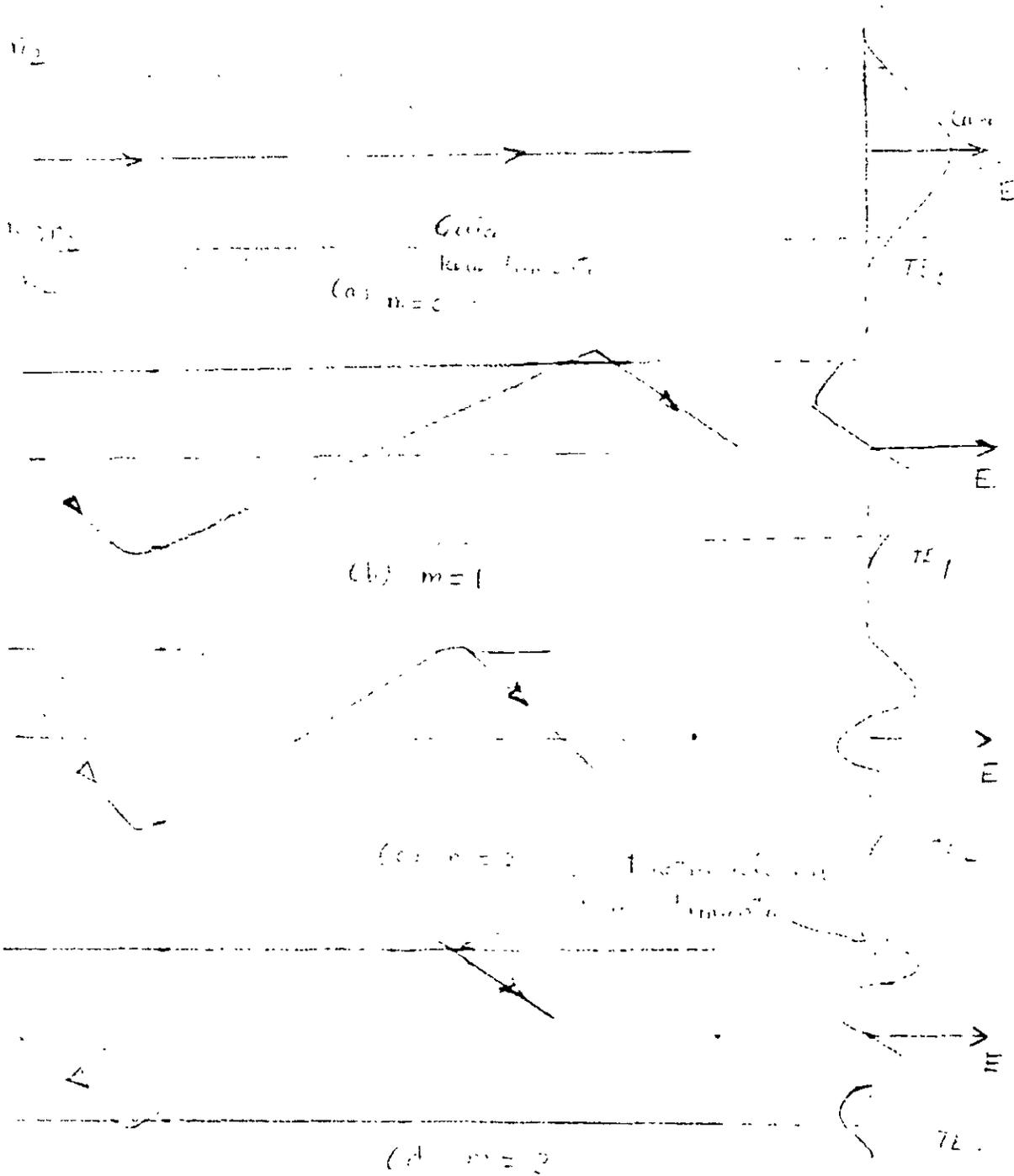


Figura 10. Modelo físico que muestra la propagación de rayos y los correspondientes



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 ilustran en la Fig. 11 como un solo rayo axial a través de la fibra.

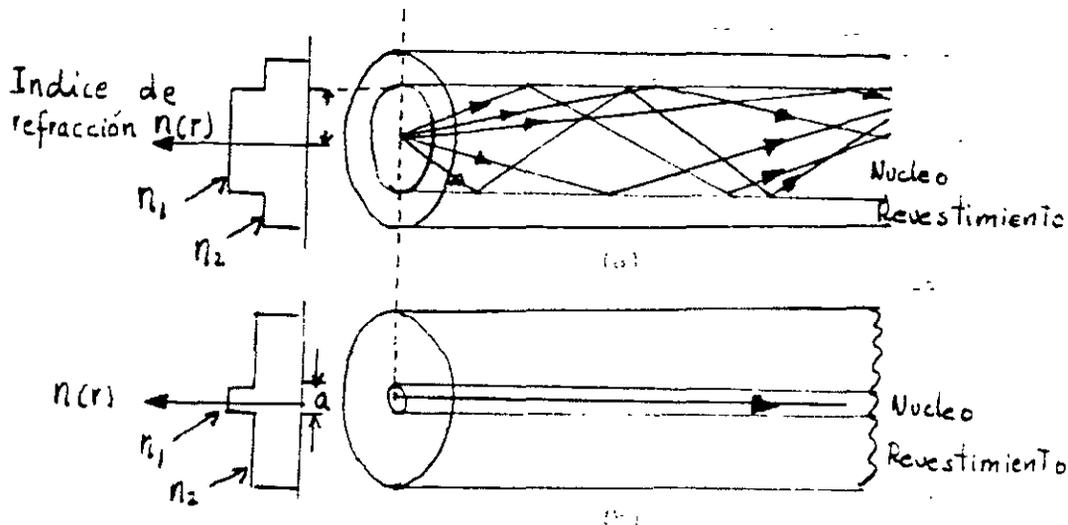


Fig. 11.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos para fibras de índice escalonado (a) fibra de índice escalonado multimodo y (b) fibra de índice escalonado unimodo.

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 mas 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 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):

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

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 Δ 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.

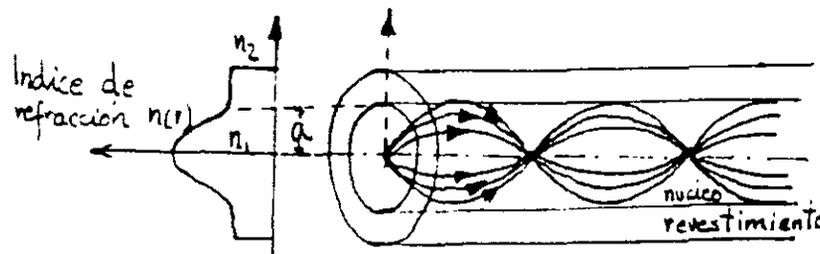


Fig. 12.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos en una fibra de índice gradual multimodal.

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.

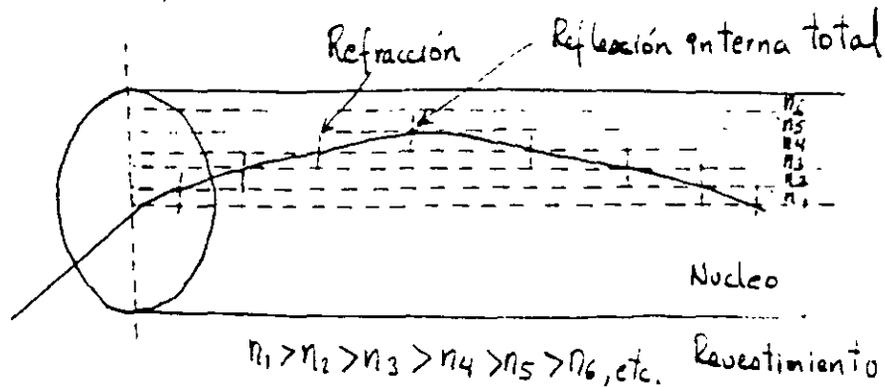


Figura 13.- Diagrama que muestra la refracción en las diversas interfaces de alto a bajo índice en una fibra de índice gradual lo que da una trayectoria curva del rayo.

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 de una región de alto índice de refracción y por lo tanto viajan a una velocidad más baja que los rayos más extremos. Esto compensa las trayectorias más cortas y reduce la dispersión en la fibra.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

DISPERSIÓN POR POLARIZACIÓN DE MODO P.M.D.

**EXPOSITOR: ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

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

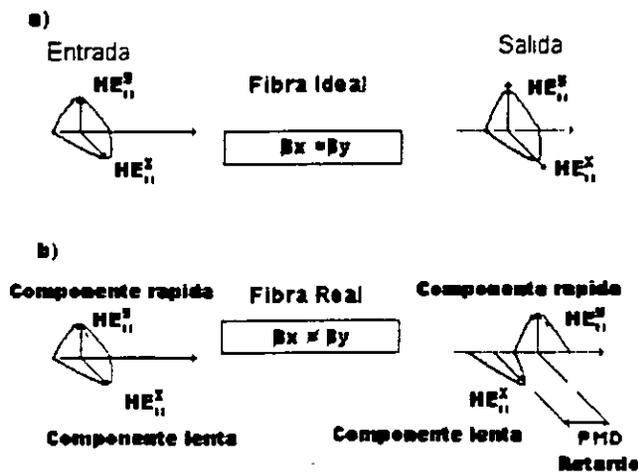


Fig. 1 Propagación en una fibra monomodo de un pulso de luz polarizado en X-Y para:
a) Una fibra ideal b) Una fibra real

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 λ 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 $(LLc)^{1/2}$ 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 Ω es una modulación senoidal de frecuencia lenta, t_g es el retardo de grupo dependiente de la longitud de onda λ , $\Delta\phi = \Omega t \Delta$ es la diferencia de fase entre las dos frecuencias de portadoras diferentes para la distancia z , Δt 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 , λ 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

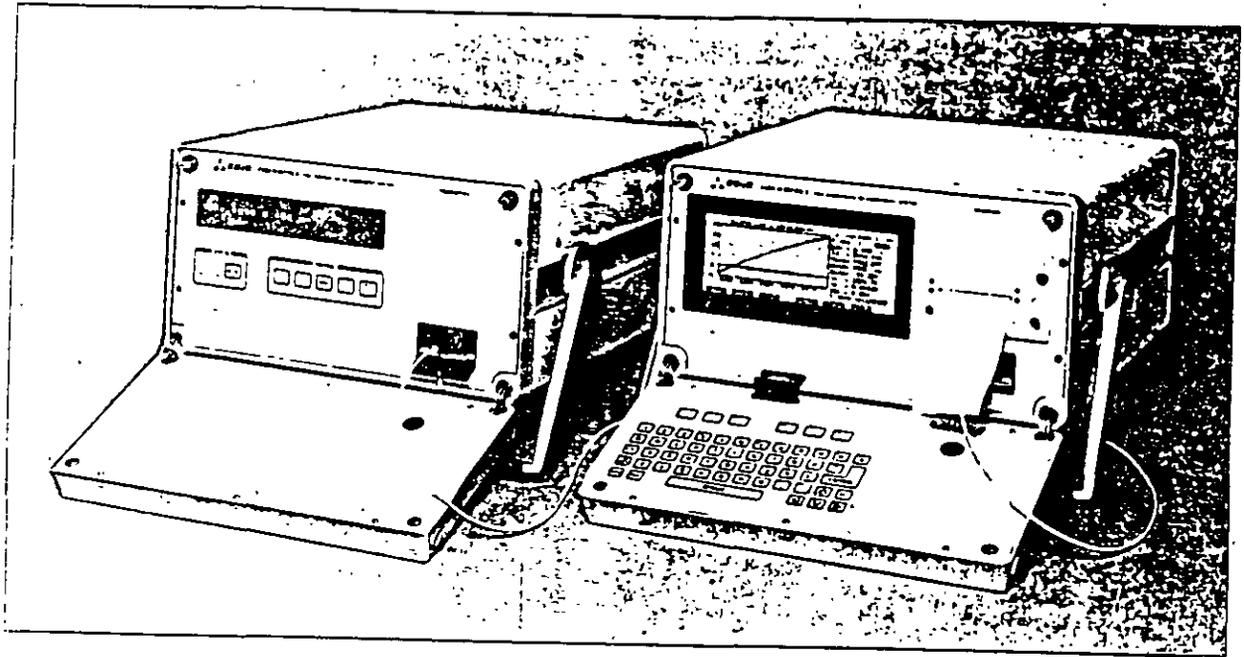
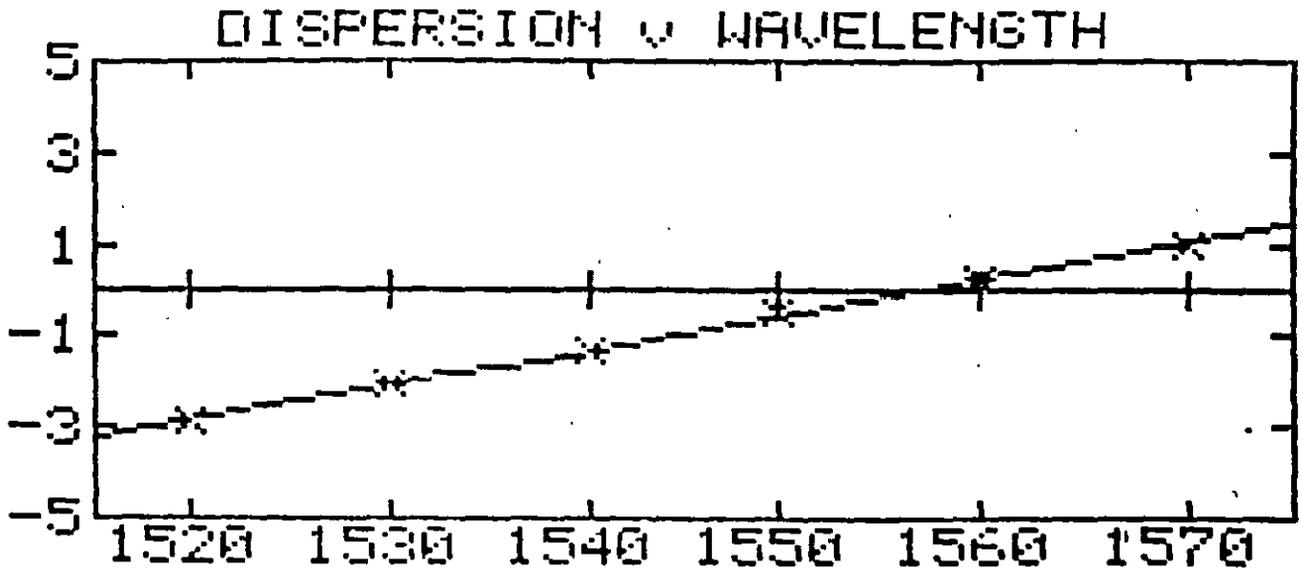


Figura 2 .- Equipo para medir dispersión cromática FD4 de EG&G.

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 1996
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	DISPERSION
nm	ps/Km
1520	-2.85
1530	-2.07
1540	-1.30
1550	-0.54
1560	0.24
1570	0.99

B = 1.066e-02 C = -1.197e+02
SLOPE = 0.07686ps.nm-2.Km-1. LAMBDA ZERO = 1556.932nm. 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

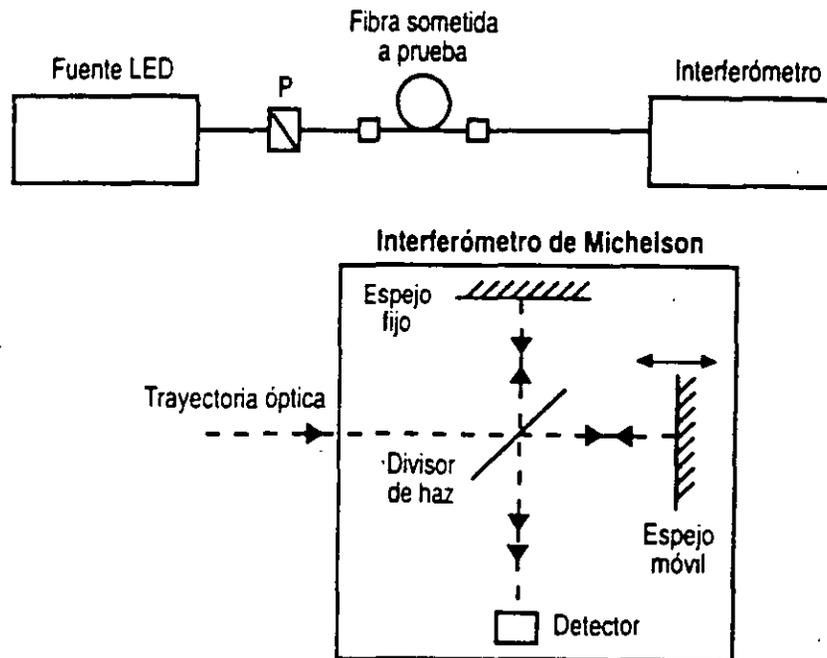


Figura 4.- Medición de la PMD por el método interferométrico.

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} .

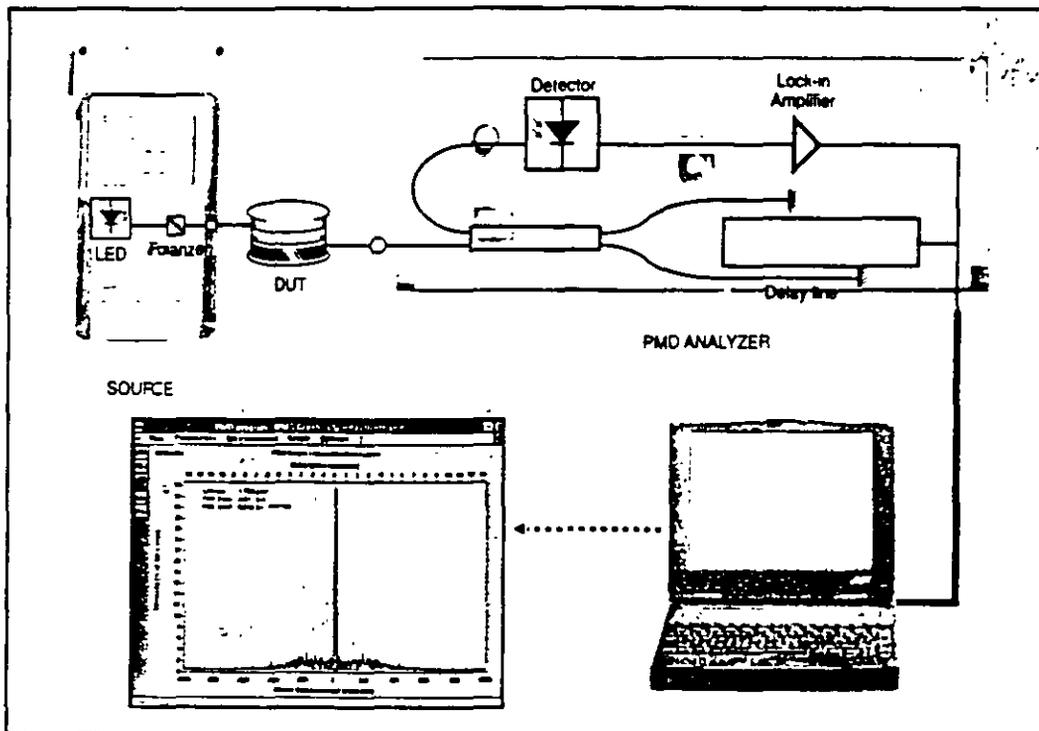
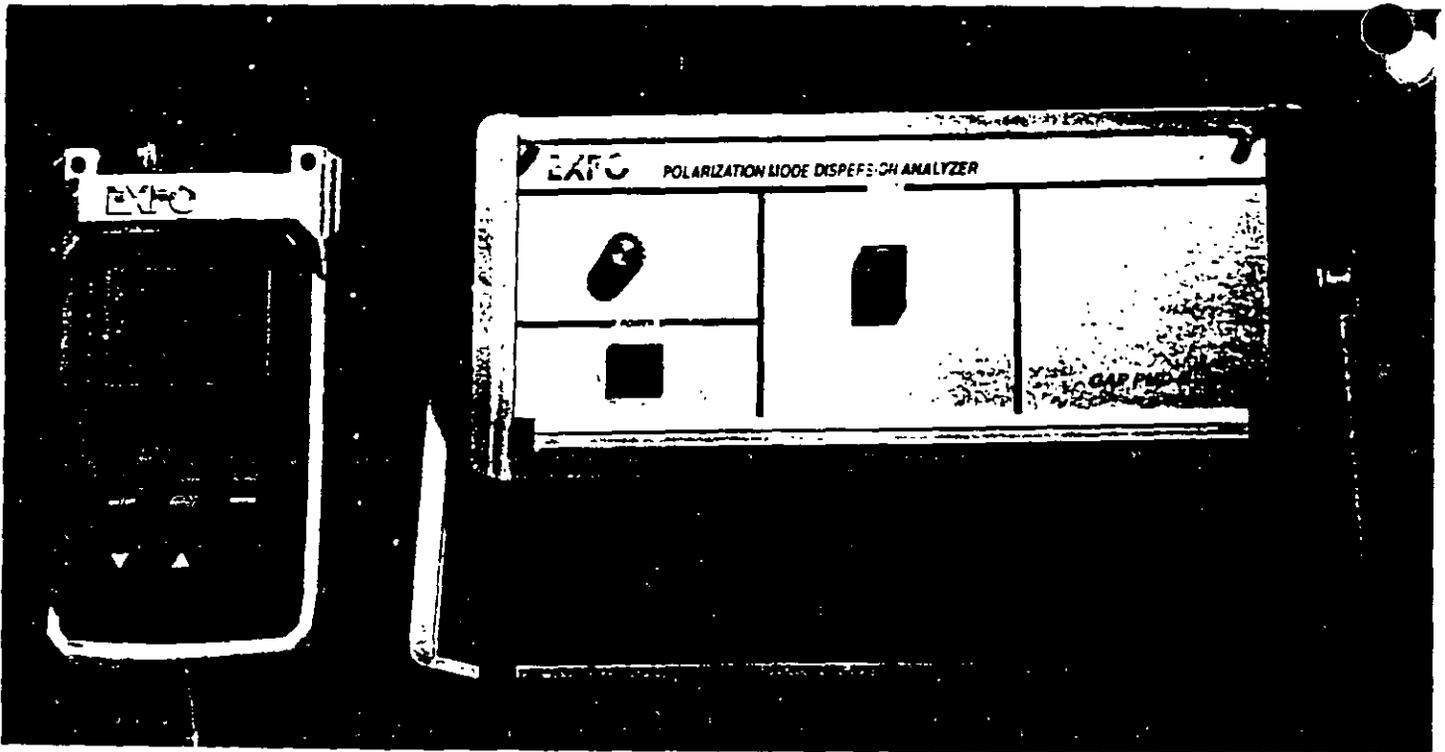


Figura 5.- Arreglo para medir PMD

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 ± 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 ^{1/2}]	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 INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

EMPALMES Y CONEXIÓN

**EXPOSITOR: ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA
PALACIO DE MINERIA
JUNIO DEL 2002**

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

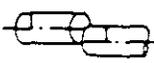
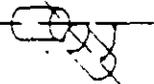
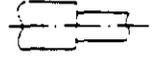
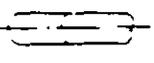
El objetivo de la conexión óptica es acoplar o transferir potencia óptica de un punto a otro. Sin embargo, en la transferencia de potencia existe pérdida causada en el elemento de conexión, estas pérdidas se clasifican en:

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 microscopio y luego mostrada 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.

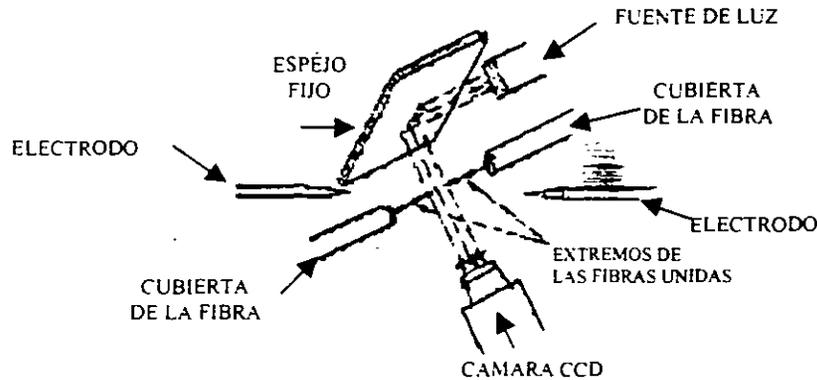


Figura 1 Principio de empalme por arco de fusión.

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.

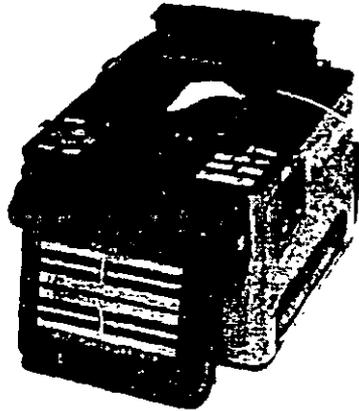


Figura 2 Empalmadora Fujikura modelo FSM-40.



Figura 3 Empalmadora Fujikura modelo FSM-30 PF.

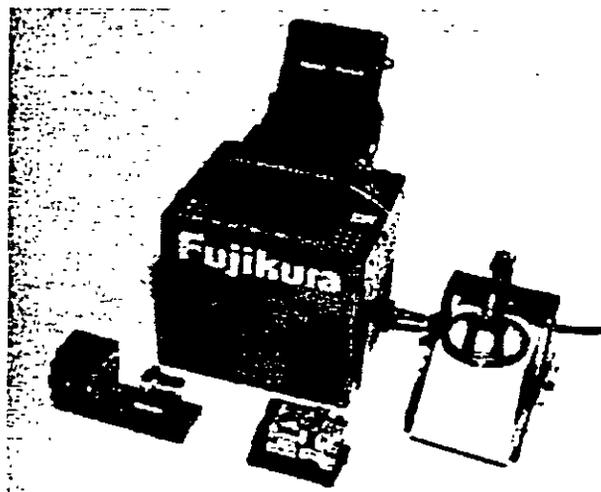


Figura 4 Empalmadora Fujikura con accesorios de corte y sujeción de cable de fibra.

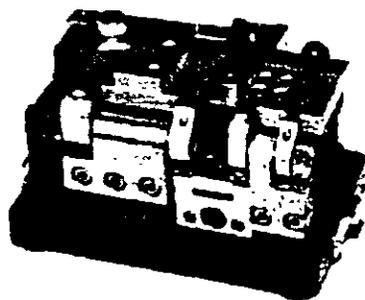


Figura 5. Limpiadora de cubierta de fibra óptica , marca Fujikura modelo HTS-11.

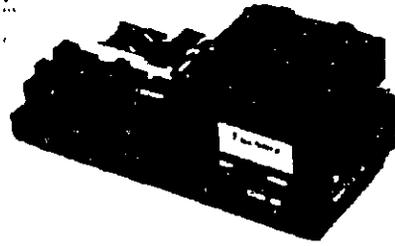


Figura 6 Cortadora de fibra óptica , marca Fujikura modelo CT-03HT-05.



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

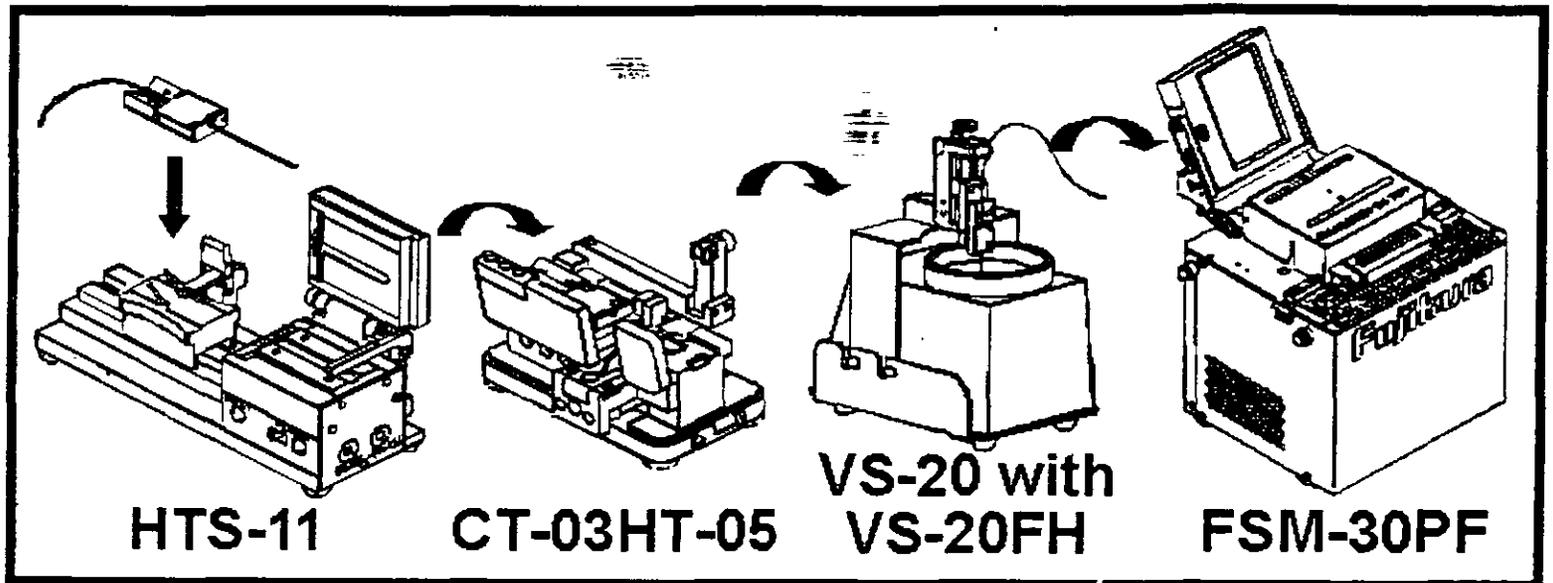
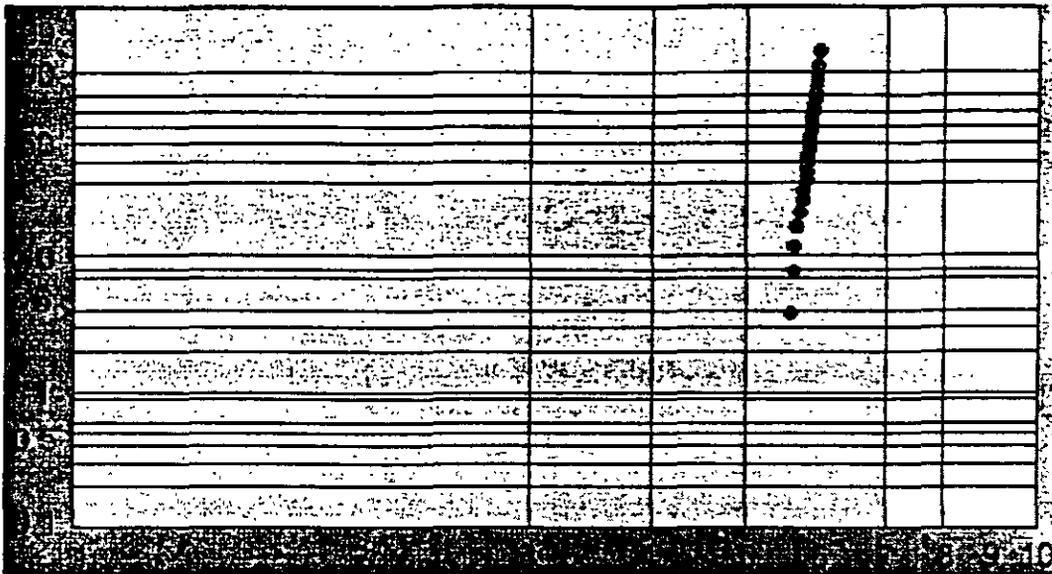


Figura 8 Vista detallada del proceso de elaboración de empalmes de fibra óptica.

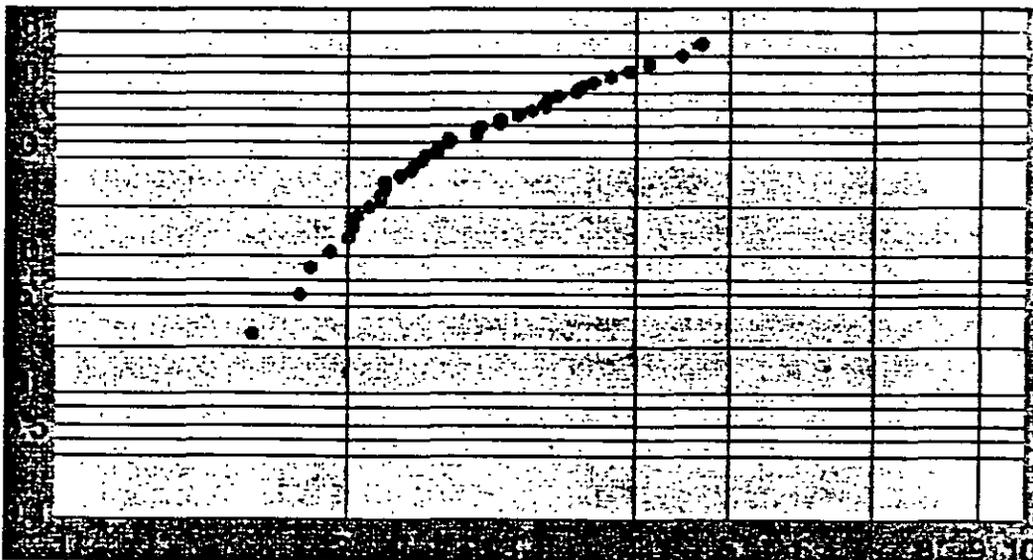
Probabilidad de ruptura[%]



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).

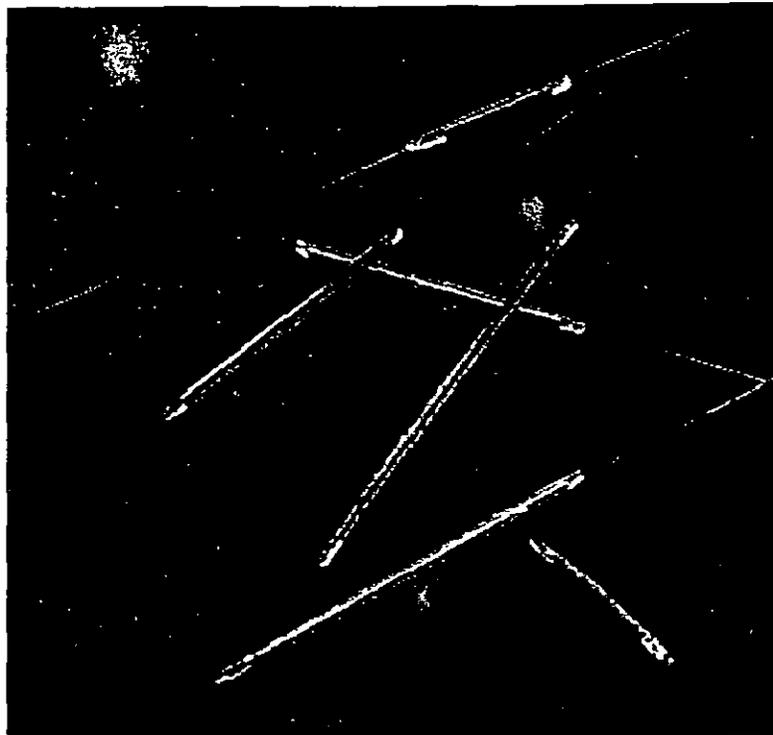


Figura 11 Empalmes protegidos por SMOUVs.

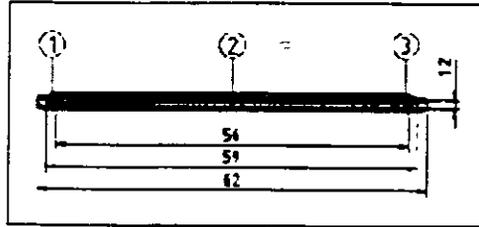
La manga protectora de empalme SMOUV-1120 provee protección mecánica y ambiental para empalmes por fusión de una sola fibra (como se muestra en la figura 11).

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.

SMOUV 1*20-01



- 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.

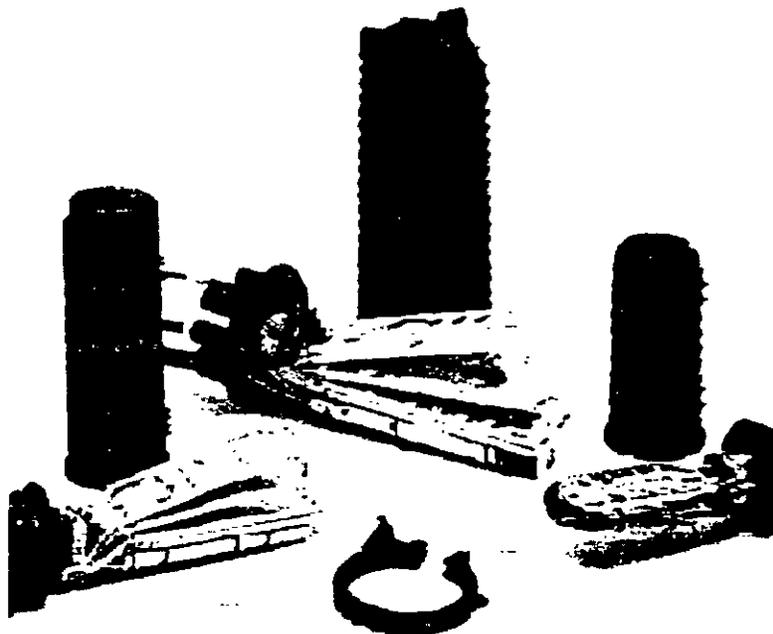


Figura 13 Cajas de empalme de Raychem.

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 400 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)

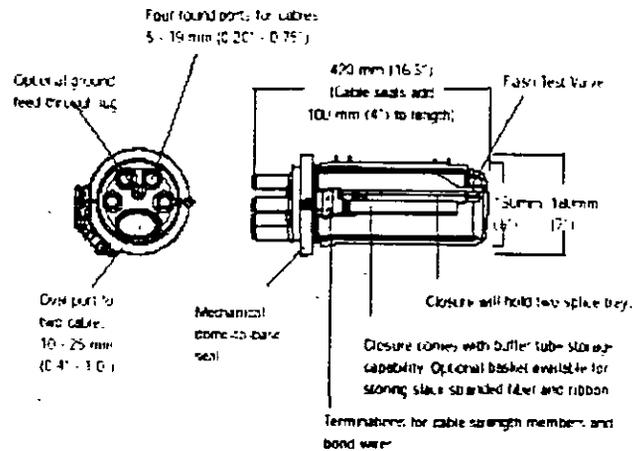


Figura 14 Elementos que componen la caja de empalme.

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

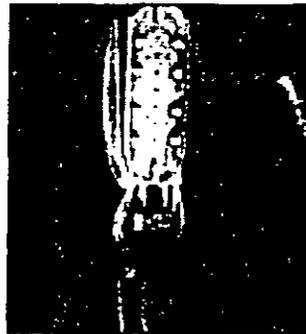


Figura 15 Charolas de empalme sin protección exterior.

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.

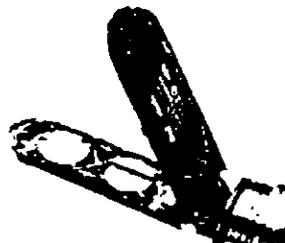


Figura 18 Contenedor de empalmes con charolas de alojamiento de fibras ópticas.

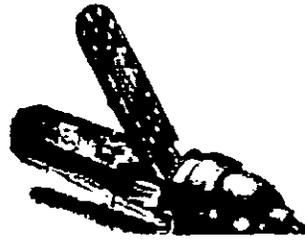


Figura 19. Contenedor de empalmes con charolas de alojamiento de fibras ópticas.

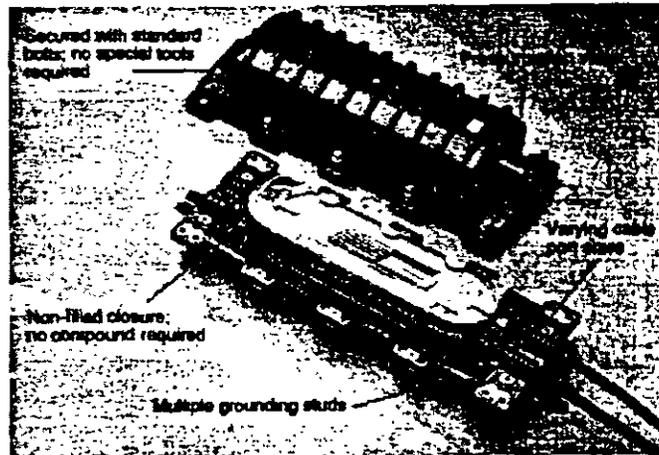


Figura 20 Contenedor de empalmes listo para ser cerrado.

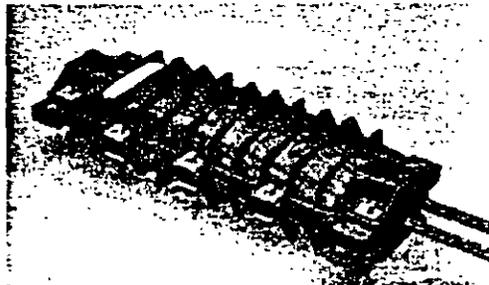


Figura 21 Contenedor de empalmes cerrado herméticamente.



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.

A continuación 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.

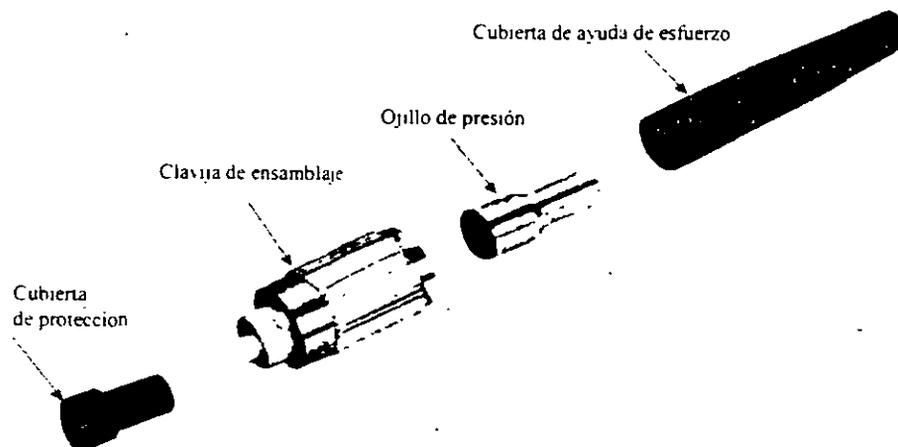


Figura 28 Conector FC/PC.

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)

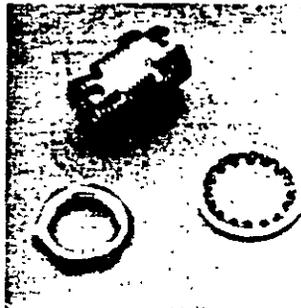


Figura 29. Centrador de montaje tipo redondo

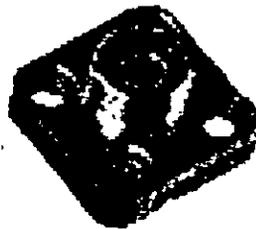


Figura 30. Centrador de montaje tipo cuadrado.

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 pigtails (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.

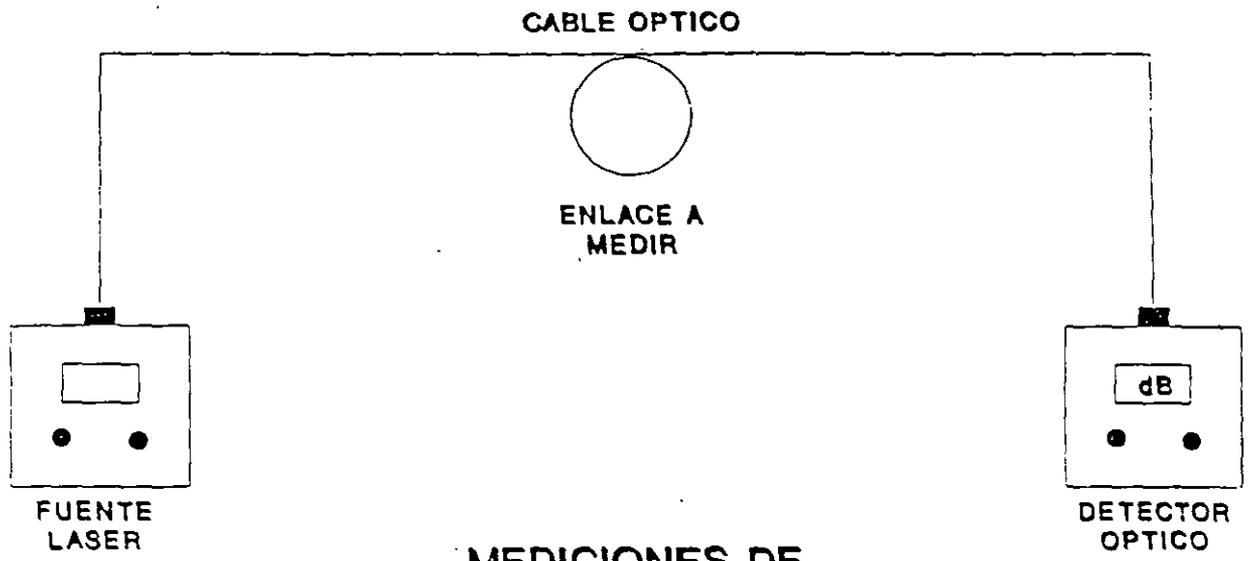
Para efectuar esta medida es preciso tener acceso a los dos extremos del cable y que entre ambos exista comunicación, por ser la última medición se contará ya con los pigtaills empalmados en ambos extremos del enlace y se tiene por lo tanto conectores, por lo que el montaje para esta prueba queda como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

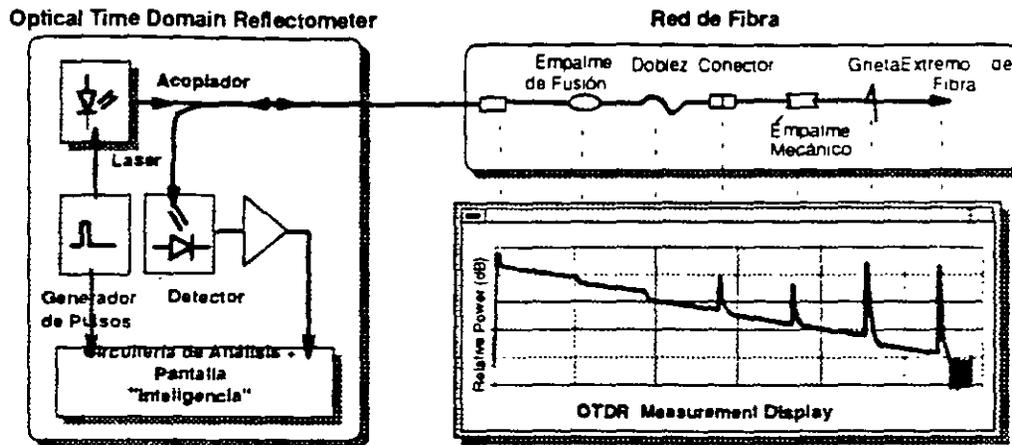
12



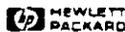
MEDICIONES DE POTENCIA OPTICA

FIG. 1

Términos Básicos - OTDR



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



© 1994 Hewlett-Packard Company
 HP 11700 Series
 No. 20
 01/94

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:

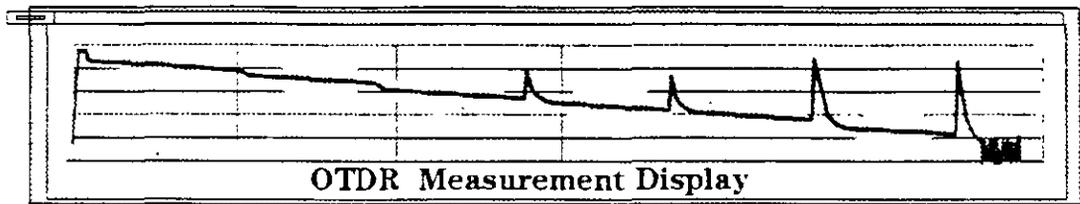
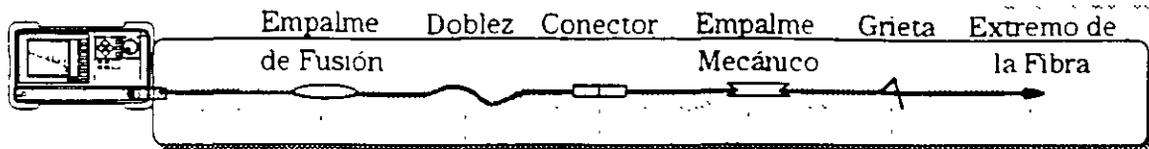
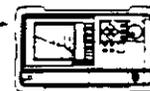
- Distance: El lugar donde se encuentran las ocurrencias de los eventos y el final de la fibra
- LOSS: Puede ser la pérdida en un empalme ó la pérdida total entre los extremos del enlace
- ATTENUATION: De la fibra en el enlace
- REFLECTION: El tamaño de la reflexión (ó pérdida por retorno) de un evento,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

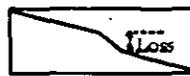
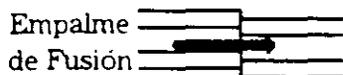
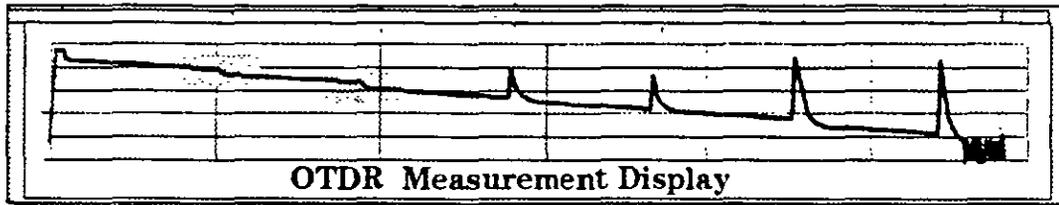
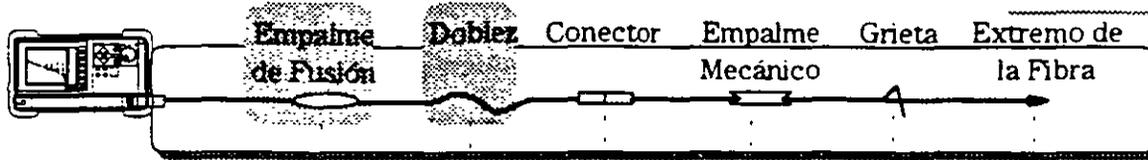
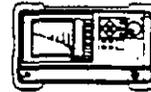
1000000000
A. 1000000000
0.00

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.

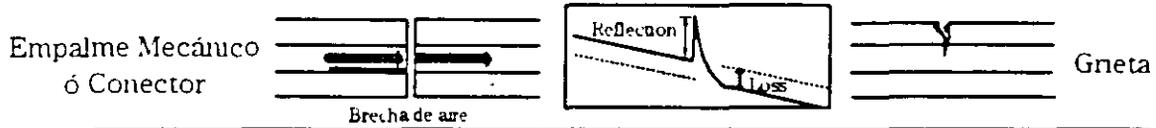
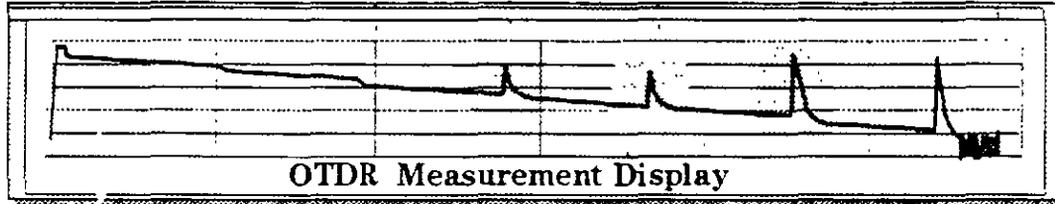
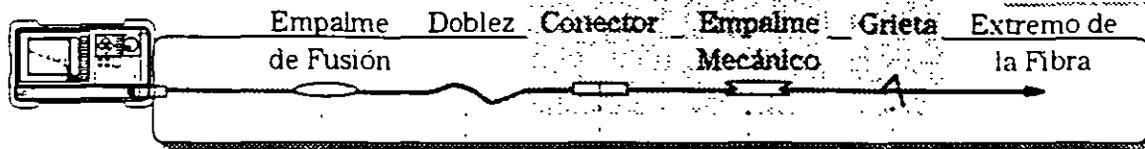
Términos Básicos - Eventos No-Reflectivos



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.

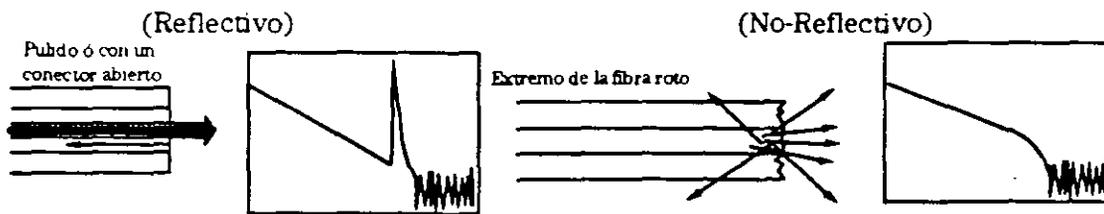
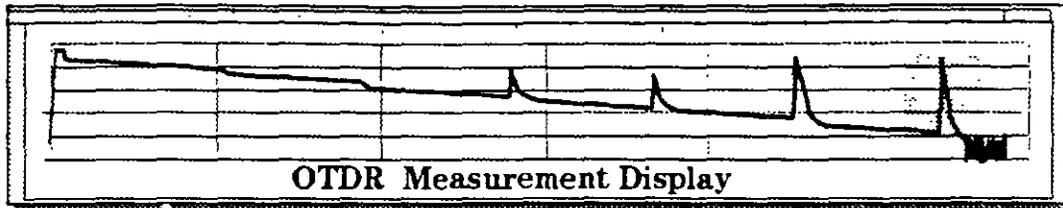
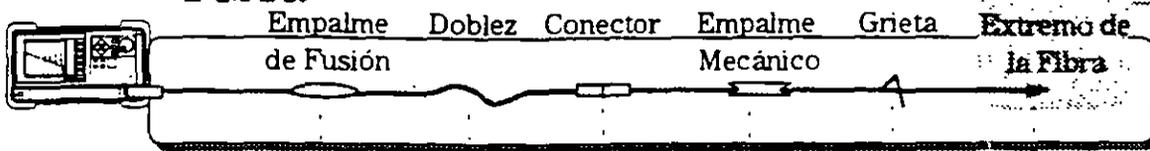
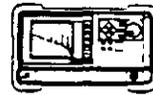
Términos Básicos - Eventos Reflectivos



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



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 (con 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 INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

RECEPTORES ÓPTICOS

**EXPOSITOR: M. EN C. ROBERTO LINARES
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

"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

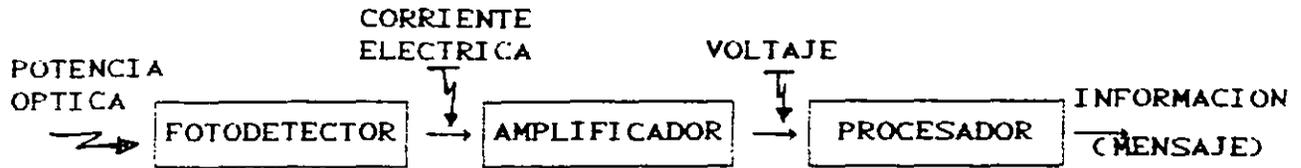
SENSIBILIDAD

INTERVALO DINAMICO

VELOCIDAD DE TRANSMISION

ESTABILIDAD

CONFIABILIDAD



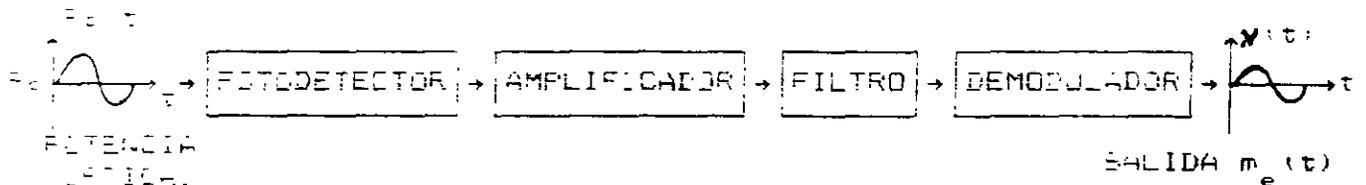
FOTODETECTOR.- CONVIERTE LA POTENCIA OPTICA A POTENCIA ELECTRICA
 LA POTENCIA OPTICA ES UNA CANTIDAD EN BANDA DE BASE
 (LAS VARIACIONES SON DE ACUERDO A LA AMPLITUD Y NO
 CON RESPECTO A LA FASE).

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODE-
 TECTOR ES MUY PEQUENA (NANOSAMPERS).

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 $P_{OPTICA}(t, m(t))$

$m(t)$ = SEÑAL ANALOGICA (PORTADORES)

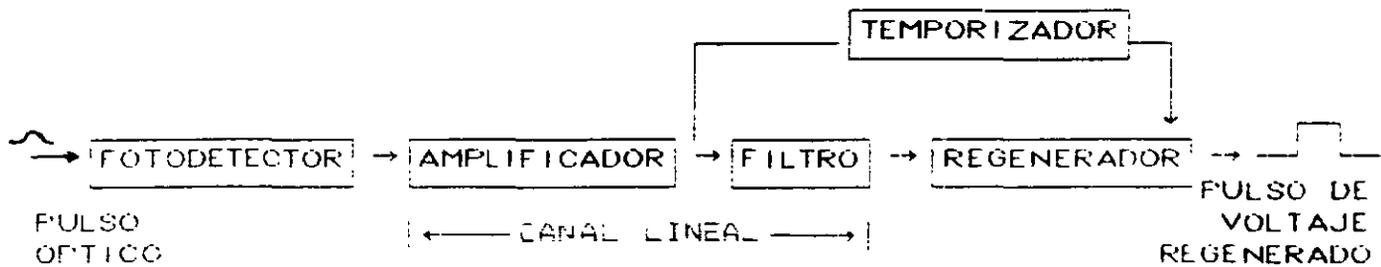
PARA UNA SIMPLE INTENSIDAD DE MODULACION

$$P_{OPTICA}(t, m(t)) = P_c [1 + \gamma m(t)]$$

$$\gamma \leq 1$$

$\gamma \leq 1$ - 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

$$f_{\text{OPTICOS}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p_p(t - kT)$$

a_k - ES "CERO" O "UNO" - HAY O NO HAY PULSO

p_p - ES LA FORMA DE UN SOLO PULSO.

T - ES EL ESPACIAMIENTO ENTRE PULSOS.

LA SEÑAL DE SALIDA DEL FOTODETECTOR ES:

$$i_s(t) = R \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p_p(t - kT)$$

R = (A/W) RESPONSABILIDAD

LA SEÑAL DE SALIDA DEL CANAL LINEAL

$$v_{\text{OUT}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p_{\text{OUT}}(t - kT)$$

p_{OUT} FORMA DE UN SOLO PULSO EN LA SALIDA DEL CANAL LINEAL.

EN UN INTERVALO DEL PULSO "1" 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.

$$P_{OPTICA}(t) = P_c \left[1 + \cos[\omega t + \gamma m(t)] \right]$$

ω = FRECUENCIA INTERMEDIA

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODETECTOR ES

$$i(t) = R P_{OPTICA}(t)$$

R = RESPONSIVIDAD = (A/W)

LA CORRIENTE SE AMPLIFICA Y SE FILTRA

SI EL SISTEMA ES CON MODULACION SIMPLE - NO SE REQUIERE DEMODULACION YA QUE LA SEÑAL ESTA EN BANDA BASE

SI EL SISTEMA ES CON SUBPORTADORA DE FASE - EL DEMODULADOR PUEDE SER PUE O UN DISCRIMINADOR.

EN CIRCUITOS ES: LA RELACION SEÑAL A RUIDO
LA NO LINEALIDAD

VENTAJAS: SENCILLIDAD
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 ENVIAR Y RECIBIR

$$MSE = \int [m_1(t) - m_2(t)]^2$$

TAMBIEN SE DEFINE: COMO UNA ESTADISTICA O PROMEDIO DE DEL CUADRADO DE TODOS LOS POSIBLES MENSAJES + 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 (UNQ), $V_{out}(t)$ DEBERA EXCEDER SIEMPRE EL UMBRAL.

LA REALIDAD.- EL RUIDO E INTERFERENCIAS (DE PULSOS ADYACENTES O DE OTROS SISTEMAS) PUEDEN AUMENTAR O DISMINUIR LA SEÑAL 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:

$$P(e) = e^{-NAV}$$

$$\text{Si } P(e) = 10^{-9} \Rightarrow NAV = 21$$

LA ENERGIA MINIMA DETECTABLE ES:

$$E = 21 h\nu$$

LA POTENCIA MINIMA DETECTABLE ES:

$$P_{MIN} = 10.5 \text{ mW } \text{ donde } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

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

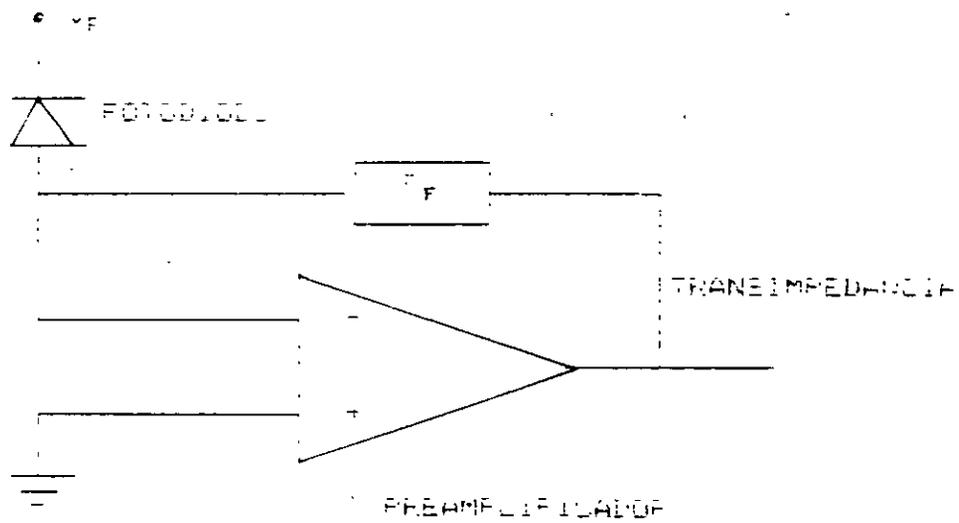
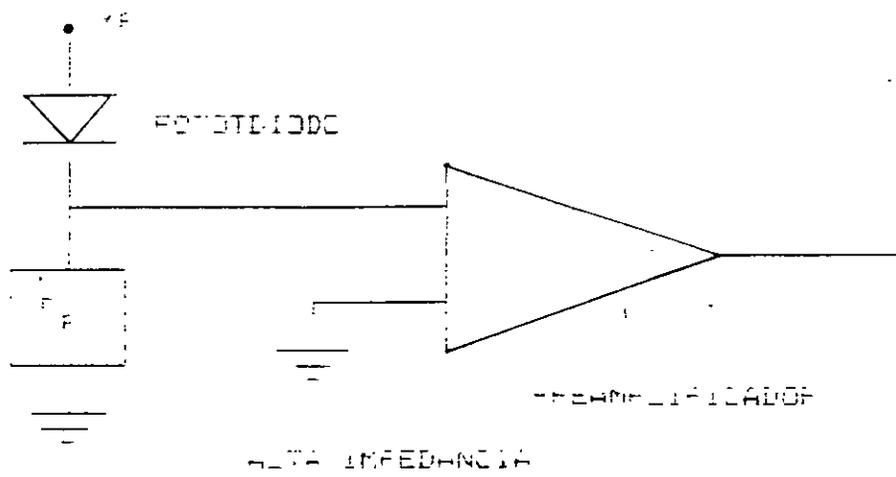
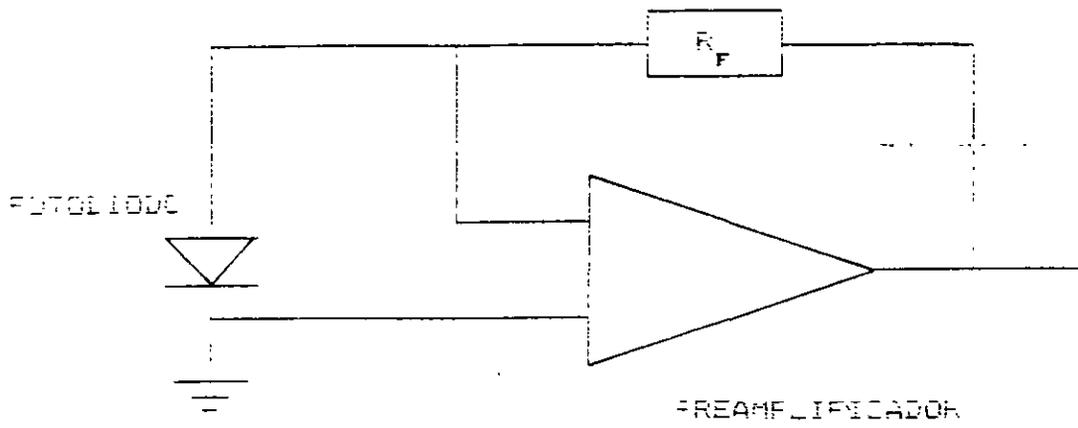
EL PREAMPLIFICADOR ES EL BLOQUE MAS CRITICO DEL RECEPTOR.

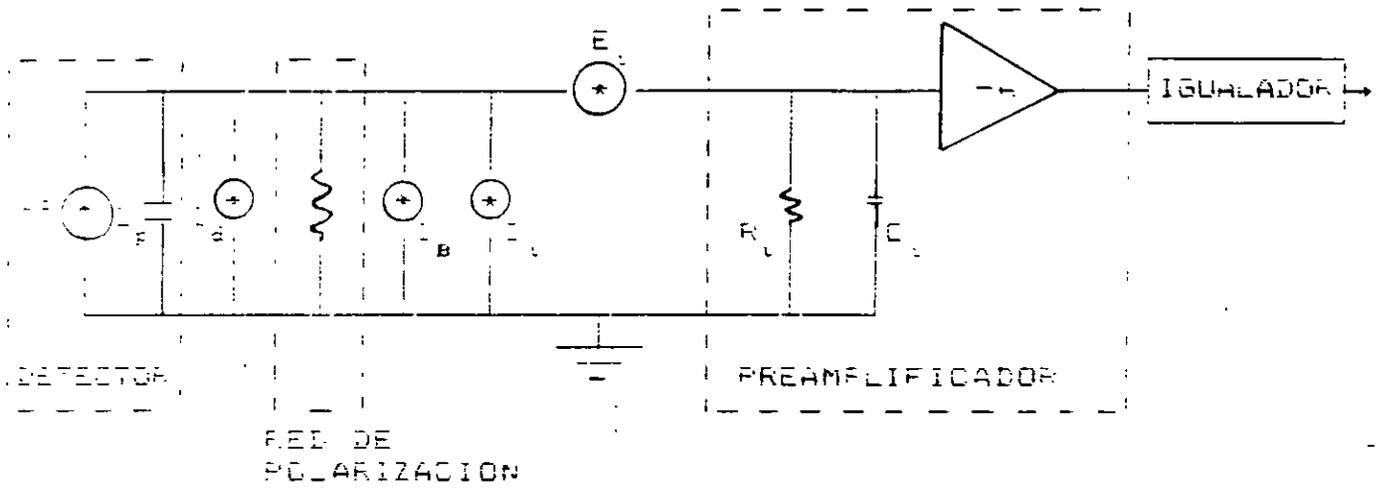
SUS CARACTERISITICAS IMPORTANTES SON:

SENSIBILIDAD
INTERVALO DINAMICO
ANCHO DE BANDA
FORMA DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

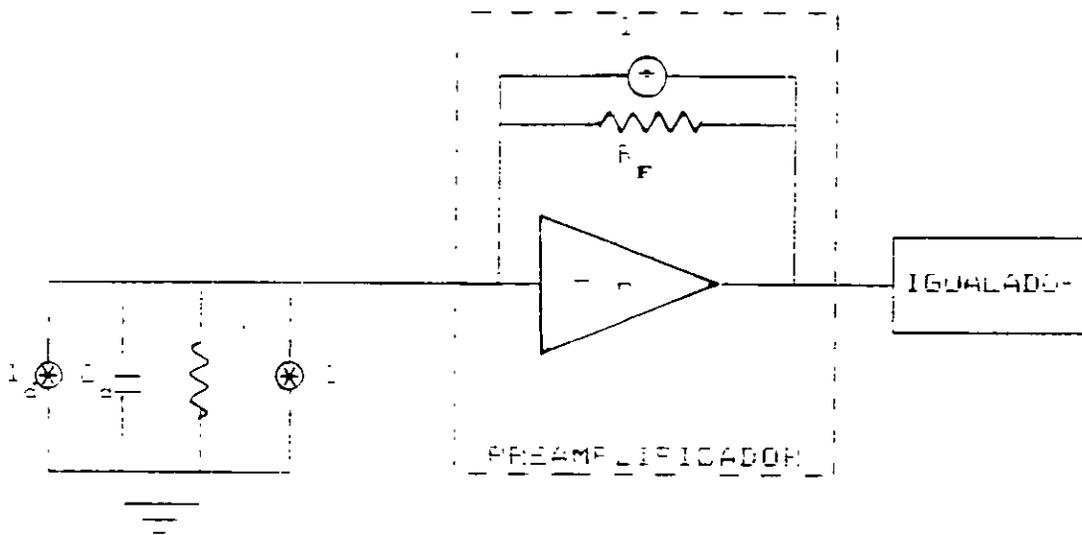
LAS CONFIGURACIONES COMUNMENTE USADAS EN LOS PREMPLIFICADORES OPTICOS SON.

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

GaAsFET

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 GaAsFET.

TIENEN COEFICIENTE DE GANANCIA BASTANTE GRANDE

FRECUENCIAS DE CORTE DE VARIOS GHZ.

RUIDO

$$v_{OUT}^2 = \frac{4kT \left[\frac{2kT}{e} \frac{1}{C_1} \right]^2 A^2 B^2}{\sqrt{C_1^2}} = \frac{4kTE}{f_{in-optima}} \left[\text{VOLTS}^2 \right]$$

DONDE:

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K Constante de Boltzman s.

$T =$ temperatura (K) = 300, para temperatura Ambiente.

$C_1 =$ capacitancia de Entrada.

$A =$ ganancia de Transimpedancia.

$B =$ ancho de banda.

$$f_{in-optima} = \frac{kT}{e R_{base}} = \frac{\sqrt{C_1^2}}{2kT \frac{1}{e} R_{base}}$$

$$f_{transimpedancia} = \frac{2kT \frac{1}{e} R_{base}}{\sqrt{C_1^2}}$$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ CORT. Carga del electron.

$R_1 =$ ganancia de Corriente de I_1

———— SI SE UTILIZA COMO T₁ UN JFET ————

EL RUIDO DE SALIDA DEL PREAMPLIFICADOR ES:

$$v_{OUT-RMS}^2 = \left[\frac{v_{OUT}}{v_{OUT}} \right]^{1.2} = \left[1.5 \frac{f_1^3}{\mu gm} \sqrt{C_1^2} A^2 \right]^{1.2}$$

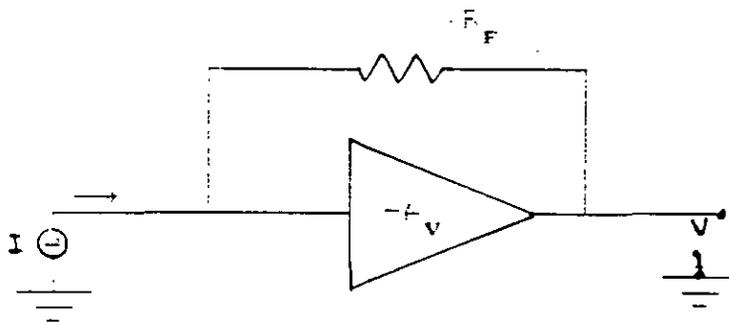
Donde μgm es la transconductancia del JFET.

DISEÑO Y SIMULACION DE PREAMPLIFICADORES OPTICOS

EL DETECTOR OPTICO ES UN FOTODIODO

CONVIERTE \rightarrow ENERGIA OPTICA \xrightarrow{P}  \rightarrow CORRIENTE $I = \eta P$

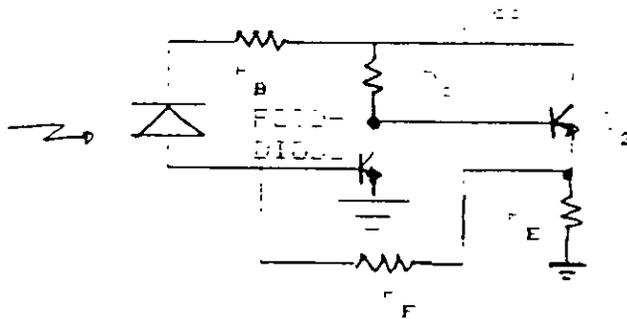
LA CORRIENTE \rightarrow SE PROCESA \rightarrow SE CONVIERTE EN VOLTAJE PARA INTERPRETAR LA ENERGIA OPTICA:



TRANSIMPEDANCIA

LA GANANCIA DE TRANSIMPEDANCIA ES = $\frac{V}{I} = R_F$

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

$$C_i = C_D + C_F + C_{be} + [C_{bc} + C_f] (1 - A_v)$$

DONDE:

C_D - CAPACITANCIA DEL FOTODIODO.

C_F - CAPACITANCIA PARASITA.

C_{be} - CAPACITANCIA BASE-EMISOR DE T_1 .

C_{bc} - CAPACITANCIA BASE-COLECTOR DE T_1 .

C_f - CAPACITANCIA DE RETROALIMENTACION.

$[C_{bc} + C_f] (1 - A_v)$ CAPACITANCIA MILLER.

EL ANCHO DE BANDA DEL PREAMPLIFICADOR ESTA LIMITADO POR:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi C_i R_i}$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \approx \frac{1}{2\pi R_i [C_{bc} + C_f] (1 - A_v)}$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{R_F}{1 - A_v} \right) [C_{bc} + C_f] (1 - A_v)} = \frac{1}{2\pi R_F [C_{bc} + C_f]}$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \left[\frac{R_F}{1 - A_v} \right] [C_D + C_F + C_{be} + (C_{bc} + C_f) (1 - A_v)]}$$

RUIDO

$$V_{OUT}^2 = \frac{4kT \left[2\pi C_1 \right] A^2 B^2}{\sqrt{3\beta_1}} = \frac{4kTB}{\gamma_{in-optima}} \left[\text{Volts}^2 \right]$$

Donde:

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K Constante de Boltzman's.

$T =$ Temperatura (K) = 300 K para temperatura Ambiente.

$C_1 =$ Capacitancia de Entrada.

$A =$ Ganancia de Transimpedancia.

$B =$ ancho de Banda.

$$\gamma_{in-optima} = \frac{kT}{C_1 \beta_{base}} = \frac{\sqrt{3\beta_1}}{2\pi C_1 B}$$

$$\gamma_{transimpedancia} = \frac{A(2\pi R_1 B)^2}{C_1 \sqrt{3\beta_1}}$$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. 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:

$$V_{OUT}^2 = \left[\frac{e^2}{4\pi C_1} \right]^2 A^2 = \left[\frac{e^2}{4\pi C_1} \frac{A^2}{\beta_1} \left(2\pi C_1 B \right)^2 \right]^2$$

donde A 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.

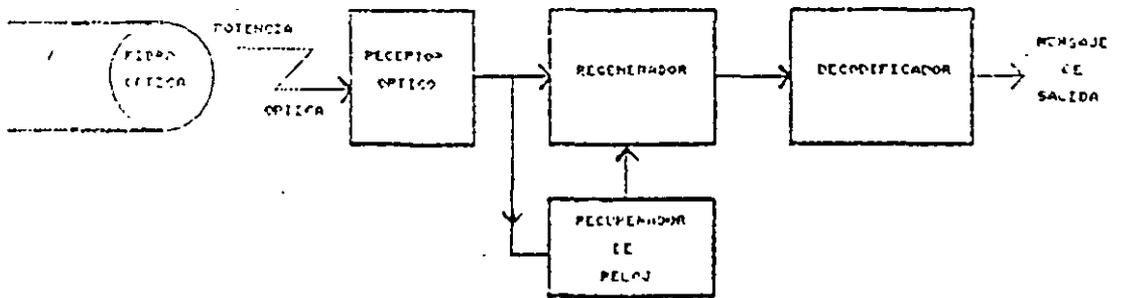
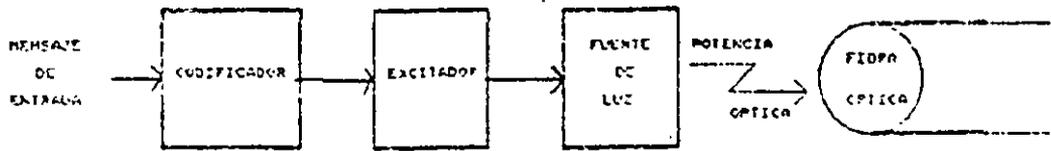
ANTECEDENTES:

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^º 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^º 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: ± 1.5 mVp-p

-IMPEDANCIA DE SALIDA: 100 Ω

-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 μ m
- VENTANA DE TRANSMISION (λ): 1300 nm
- EFICIENCIA TIPICA: 70%
- FRECUENCIA DE CORTE TIPICA: 700 MHz PARA RL = 50 Ω
- VOLTAJE DE POLARIZACION: 25 V - 40 V
- FACTOR DE RUIDO DE EXCESO: 9
- VALOR DE X = 0.95
- CORRIENTE DE OSCURIDAD: 0.33 μ 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 μ A	52.3 μ A	

El fotodetector está acoplado a un tramo de fibra óptica, el núcleo de la fibra es de 50 μm y el primer recubrimiento óptico es de 125 μm . 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.

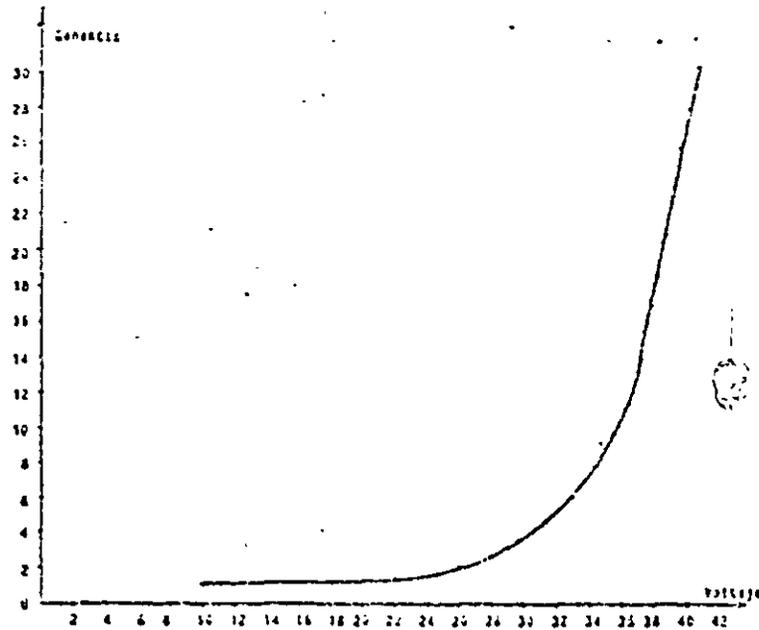


Fig. 3.1.-Característica experimental Ganancia-Voltaje de polarización del APD de nujitsu FD13R12JT.

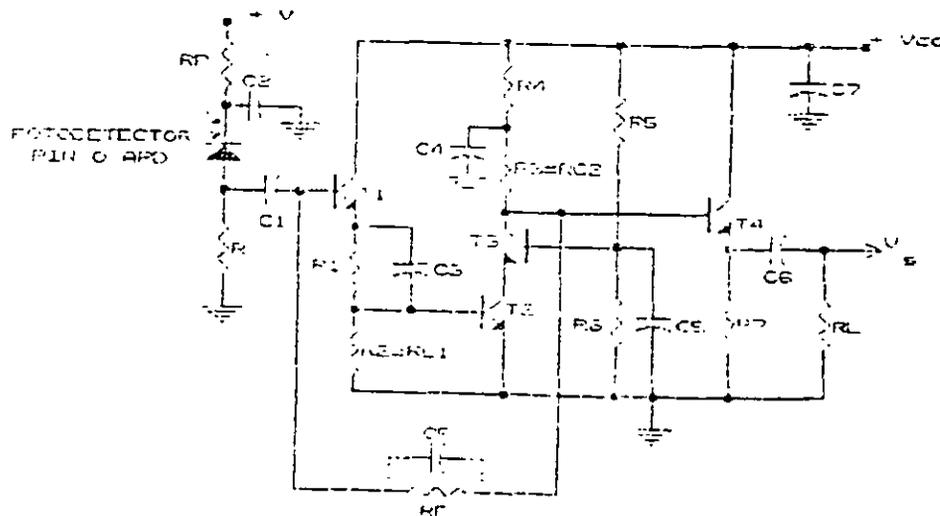


Fig. 3.2.-Circuito de configuración CC-cascade

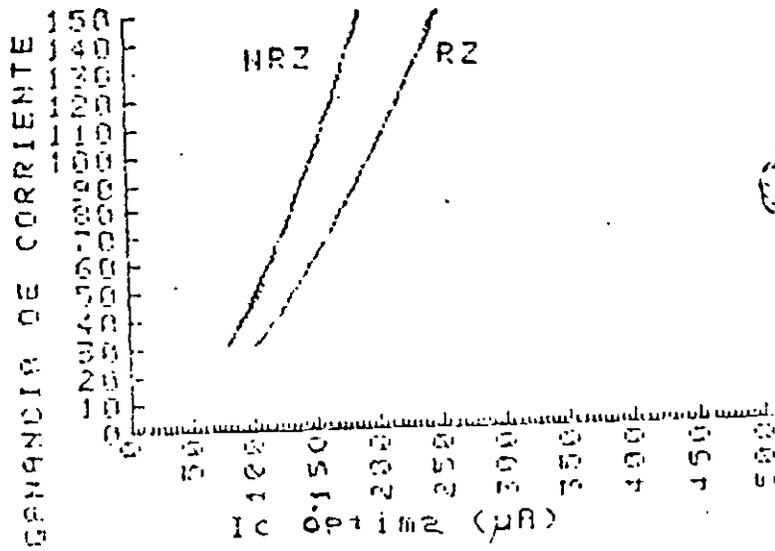


Fig. 3.3.-Comportamiento de la corriente de colector óptima para el intervalo de β del transistor MRF931.

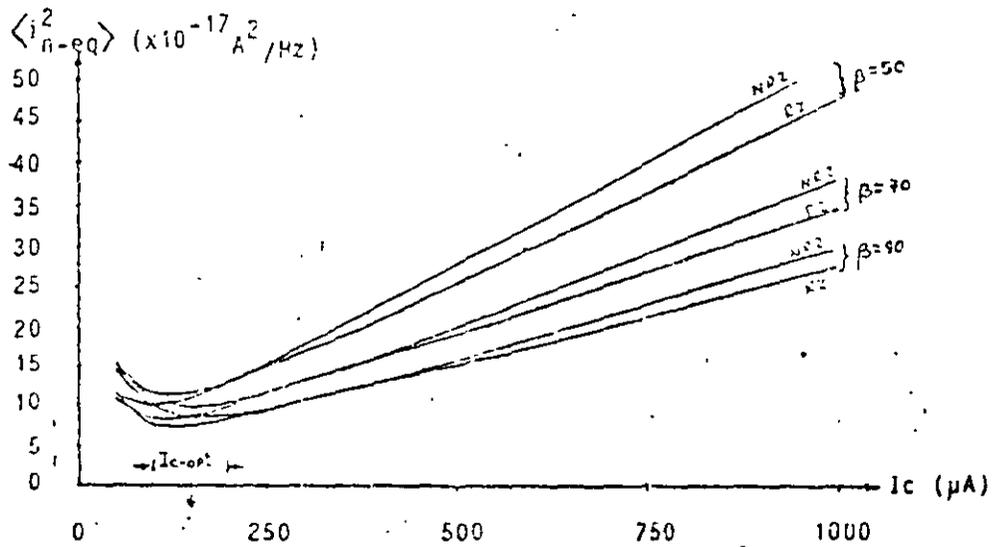


Fig. 3.4.-Comportamiento de la corriente de colector de T_1 contra el valor cuadrático medio de la corriente de ruido equivalente de entrada, para diferentes β y los formatos RZ y NRZ

para el formato RZ, $Z_{\text{trans-BJT}} = 1094.5$

para el formato NRZ, $Z_{\text{trans-BJT}} = 1053.6$

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

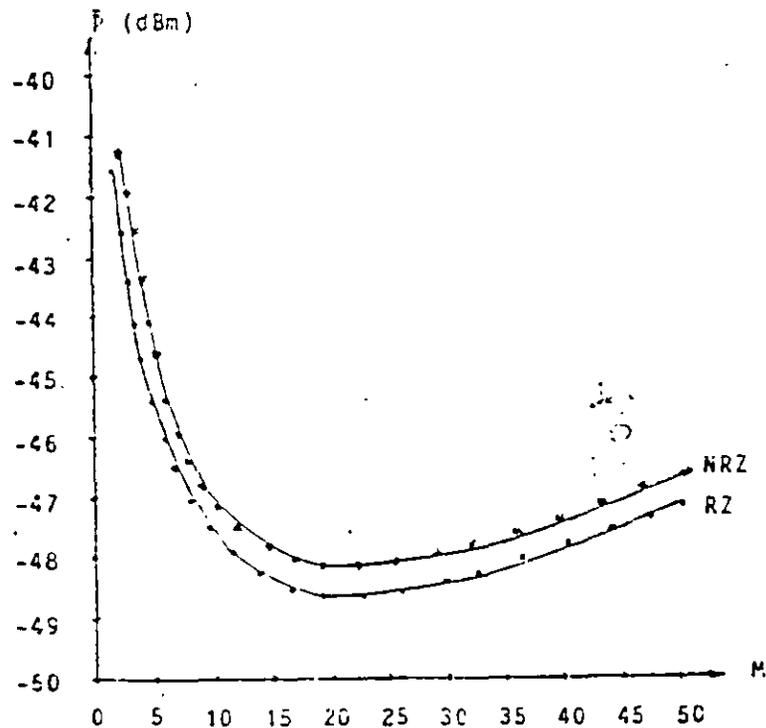


Fig.3.5.-Sensibilidad del preamplificador contra ganancia del APD.

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

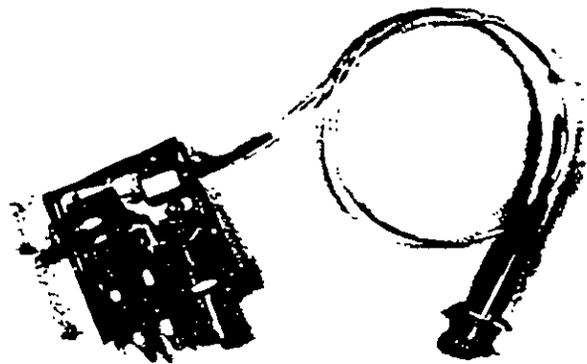
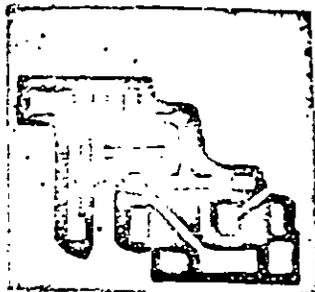
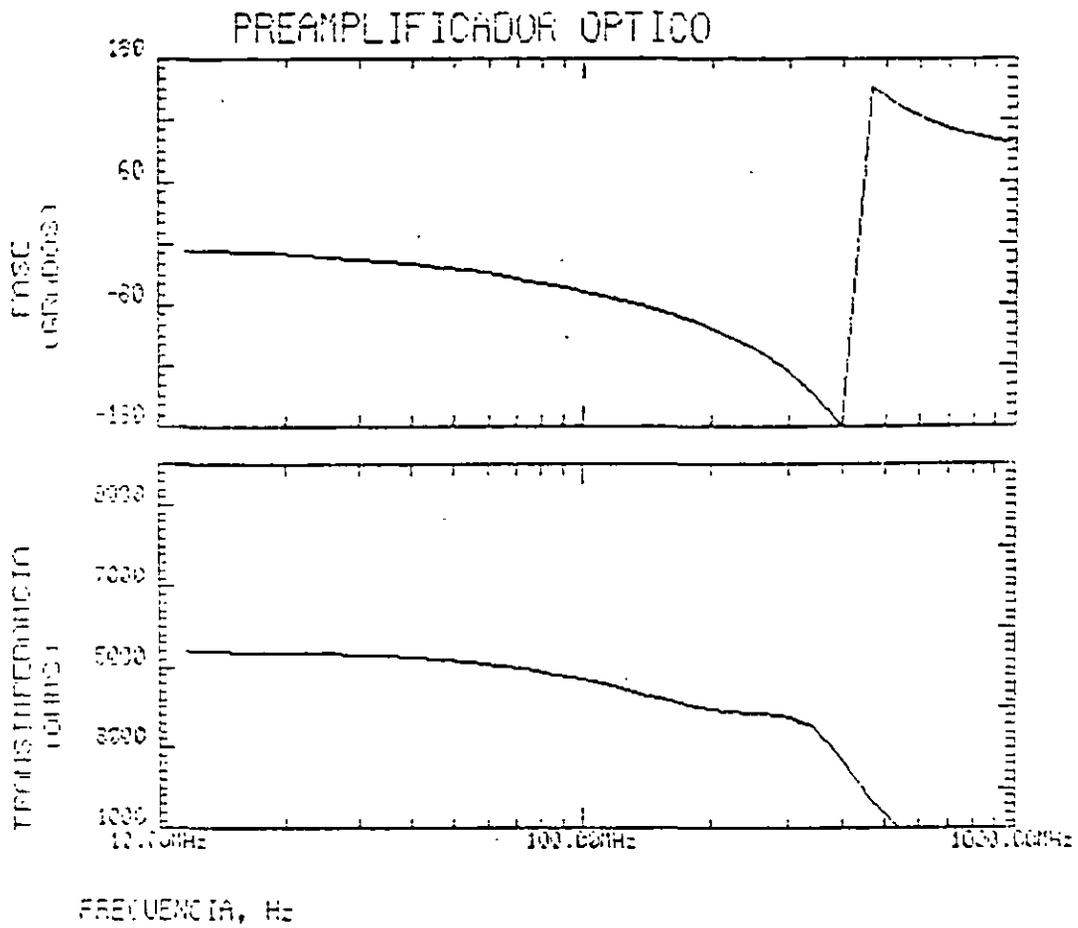


Fig.4.6.-Circuito impreso de los preamplificadores y fotografía de uno de ellos terminado.

4.12.-CONSTRUCCION DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

El amplificador con CAG se construye en una tableta de fibra de vidrio de doble cara de cobre de 16 x 19 cm. Una de las caras se utilizo para las pistas del circuito y la otra como plano de tierra y pistas de alimentacion. En esta tableta tambien se construyo el filtro Thomson y se dejo el espacio suficiente para colocar el preamplificador y la fuente de polarizacion con control y proteccion 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 optico.



FRECUENCIA, Hz

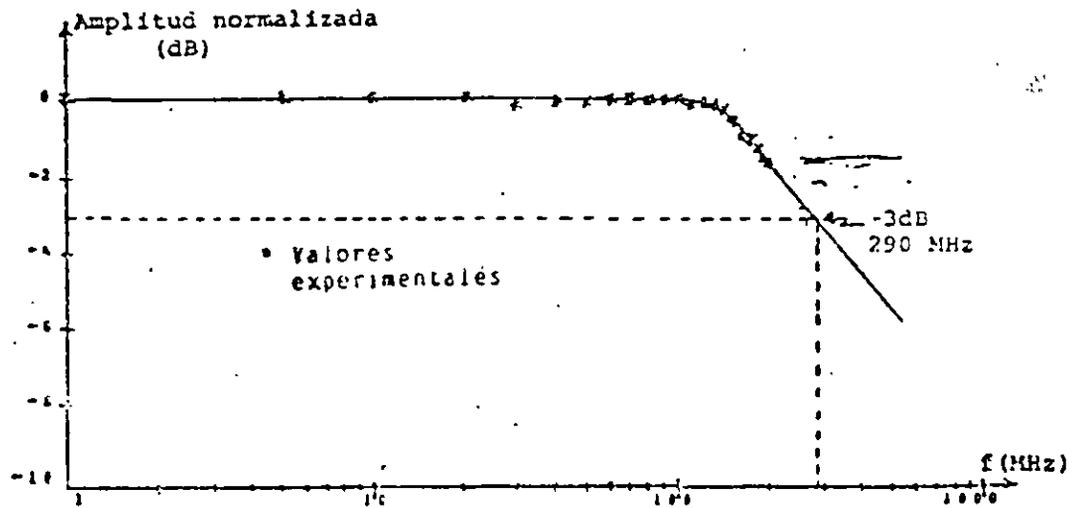
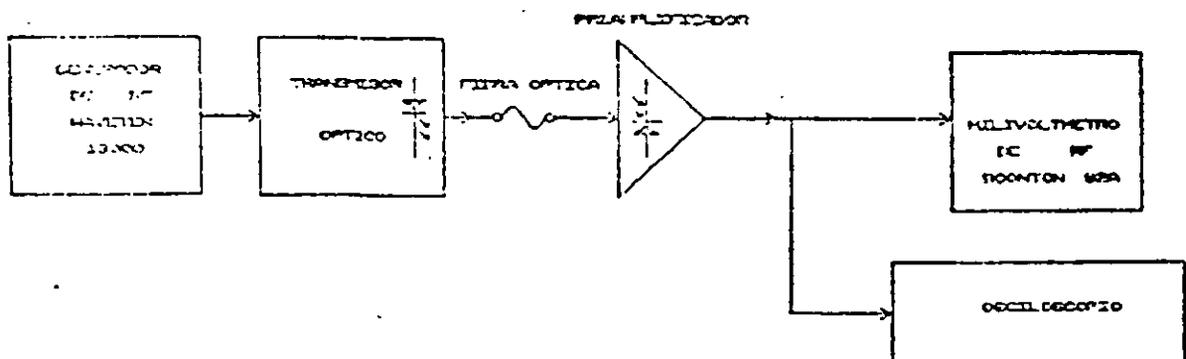


Fig. 4.11.-Característica amplitud-frecuencia del preamplificador óptico.



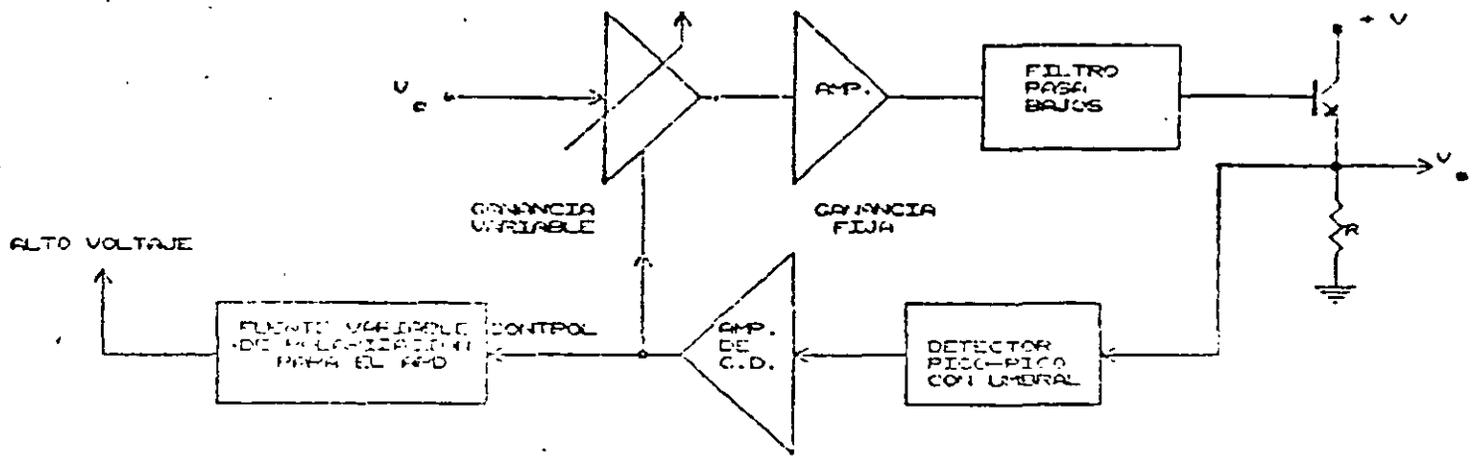


Fig.2.13.-Diagrama a bloques del amplificador con CAG

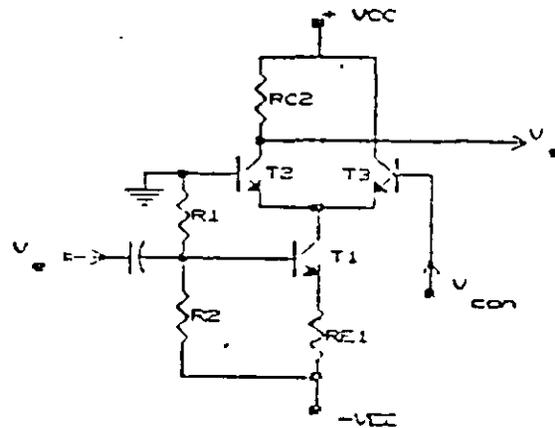


Fig.3.6.-Circuito de la etapa de ganancia variable

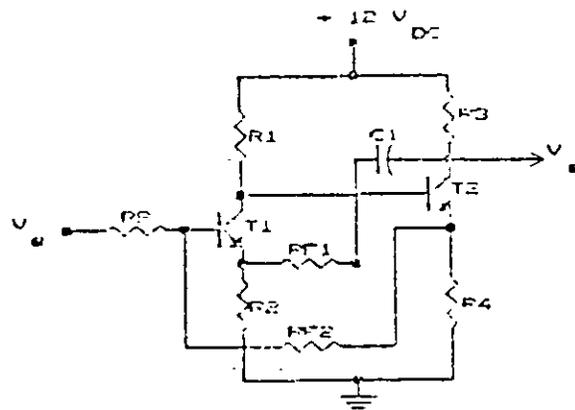


Fig.3.7.-Circuito del amplificador de ganancia constante.

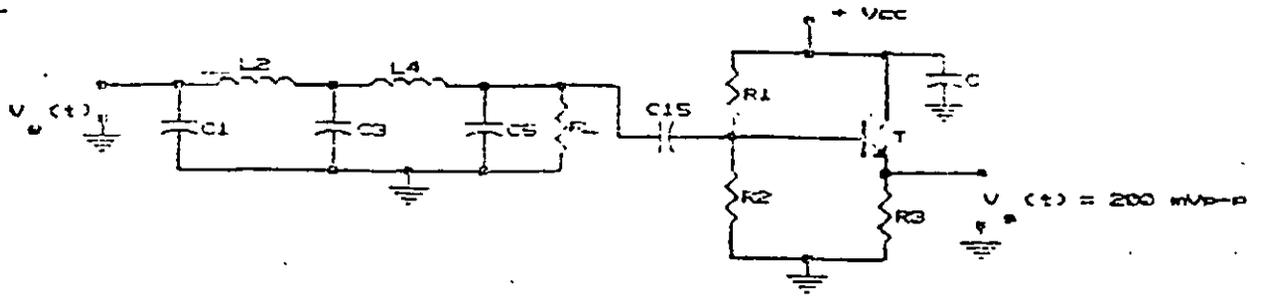


Fig.3.9.-Circuito del filtro Thomson con etapa de desacoplamiento.

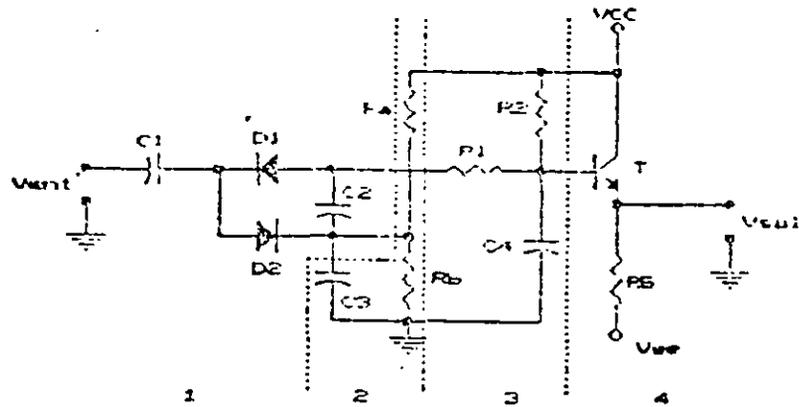


Fig.3.11.-Circuito del detector pico-pico

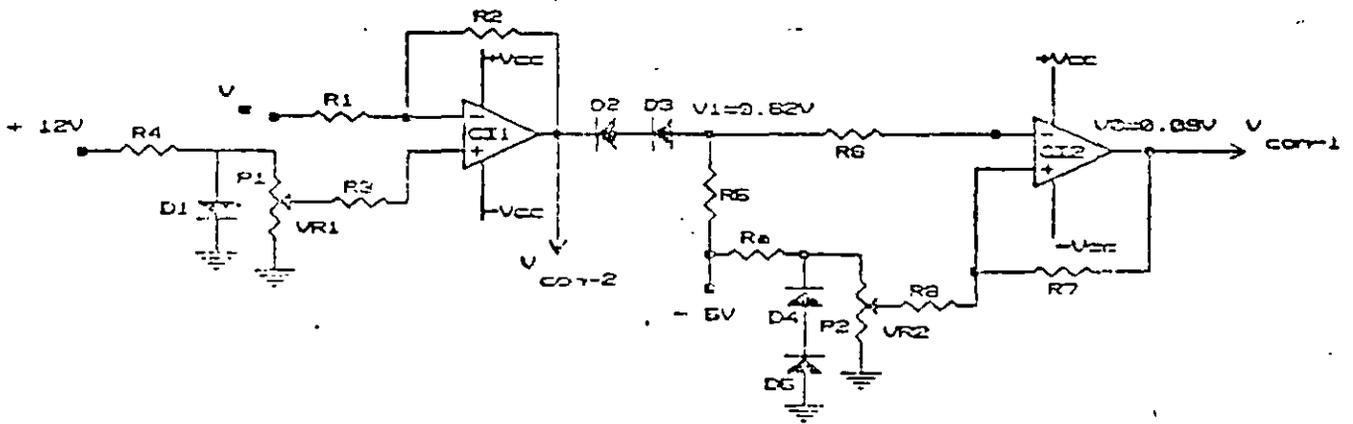


Fig.3.15.-Red de retroalimentación para el control automático de ganancia del receptor óptico

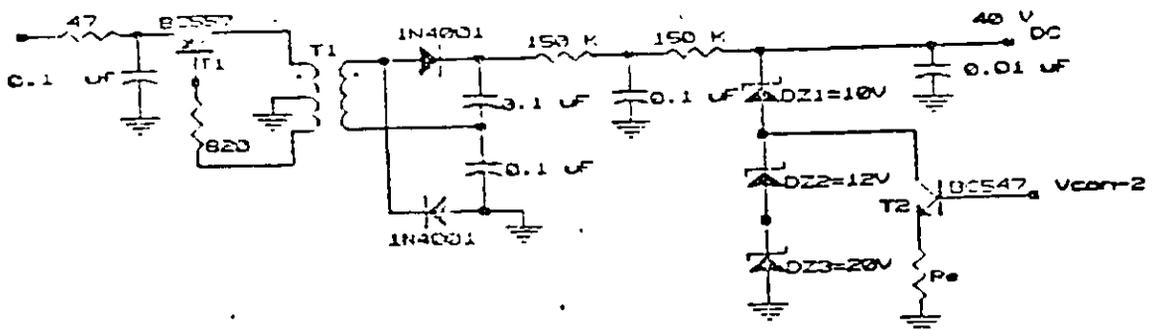


Fig.3.13.-Circuito de la fuente de polarización del APD con 29

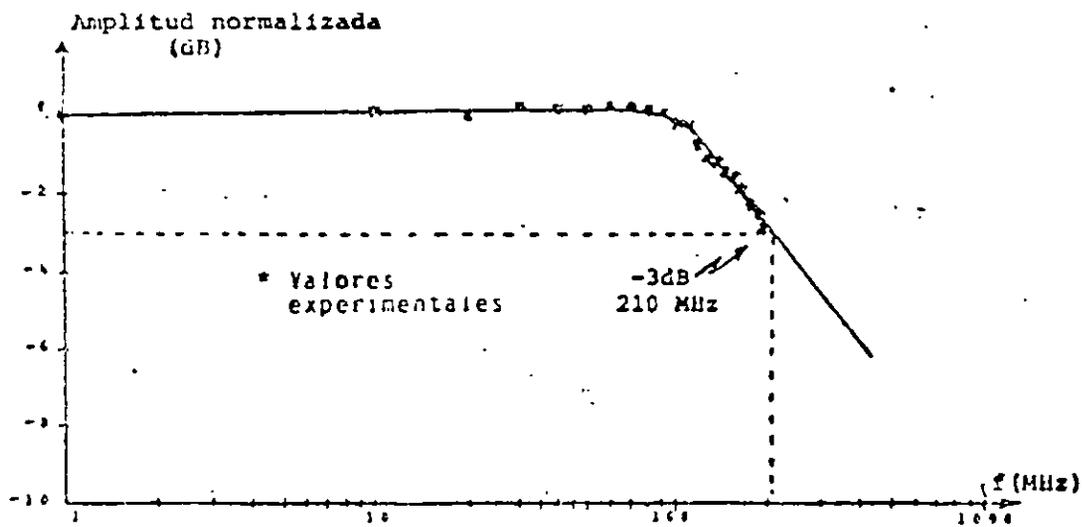
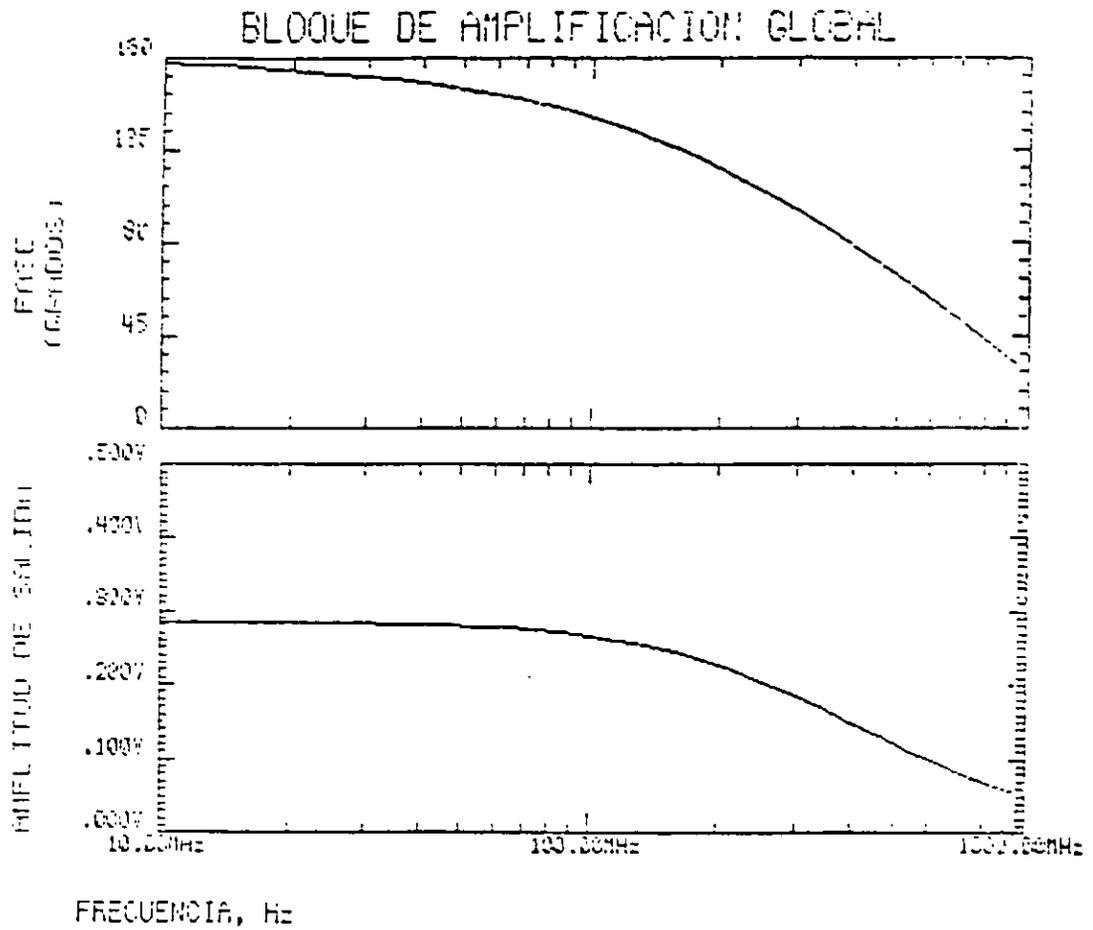


Fig.4.17.-Característica amplitud frecuencia del bloque de RF

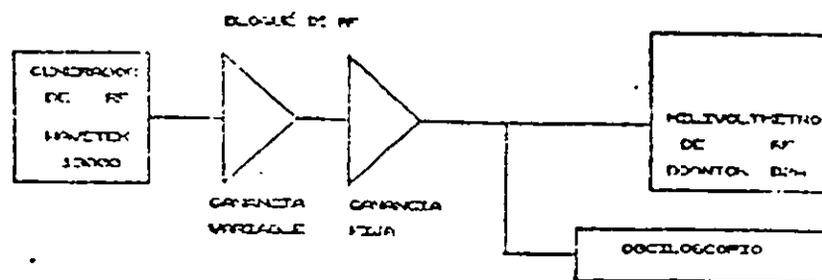
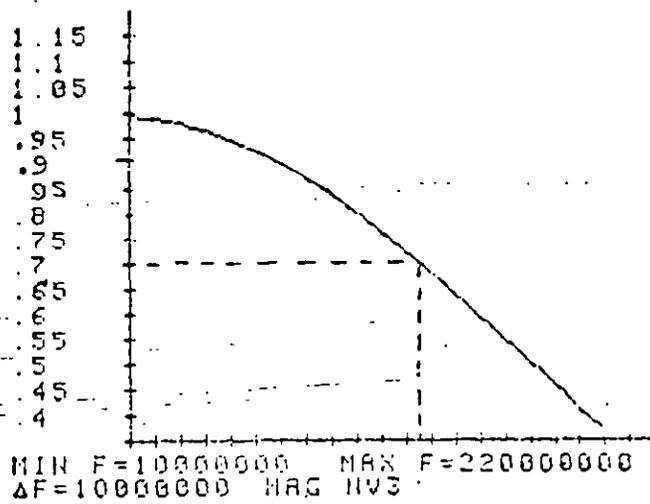
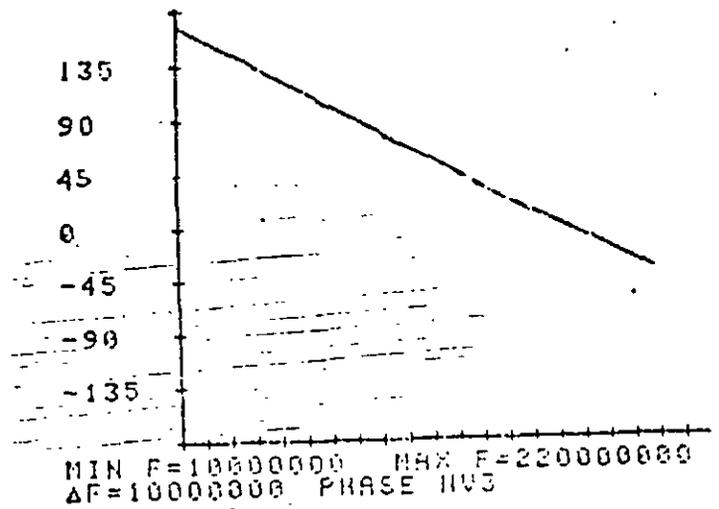


Fig.4.18.-Sistema de medición para la característica de amplitud frecuencia del bloque de RF



(a)



(b)

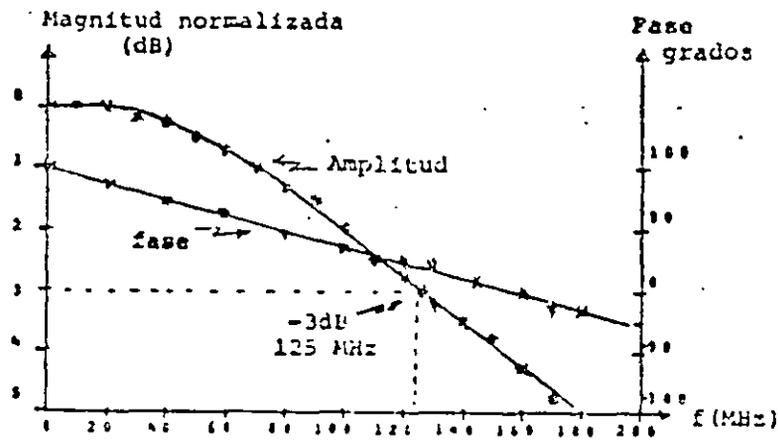


Fig.4.21.-Características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de amplificación de RF en cascada con el filtro Thomson

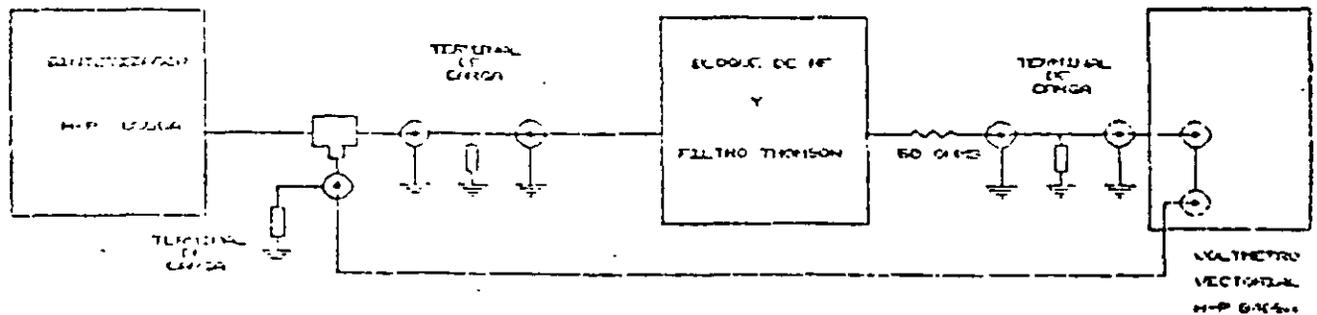


Fig.4.22.-Sistema de medición de las características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de amplificación de RF

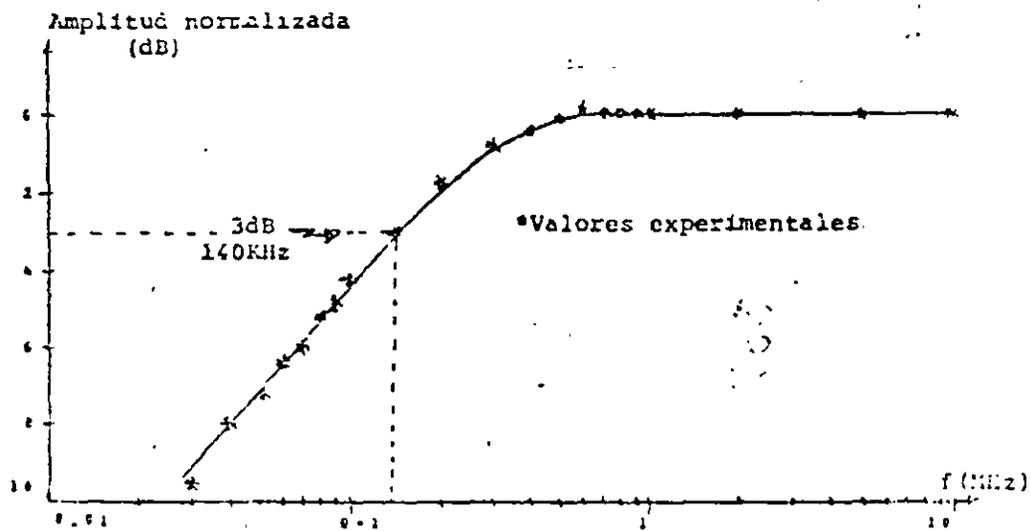
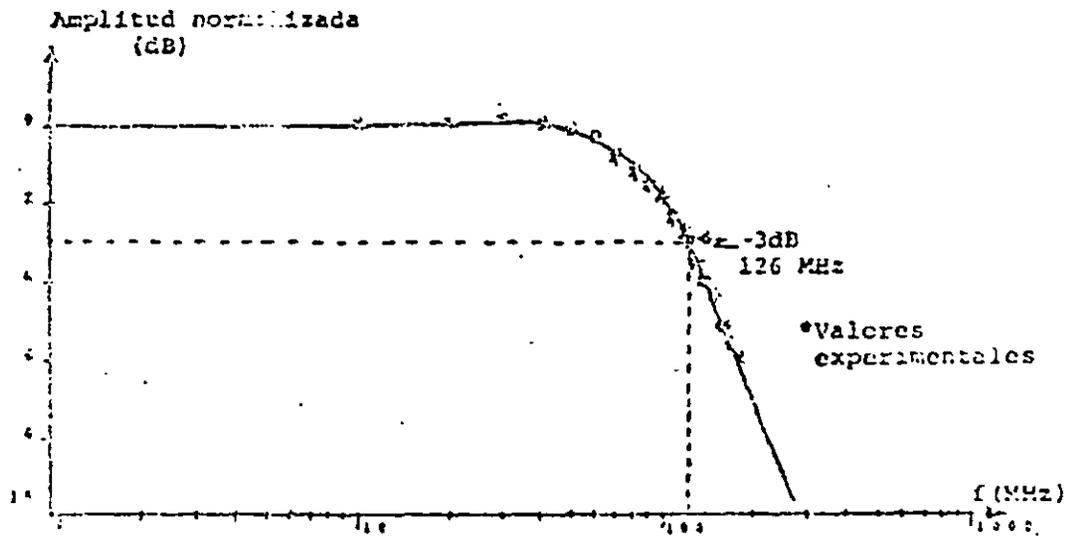


Fig.4.26.-Característica amplitud-frecuencia del receptor óptico para bajas frecuencias.

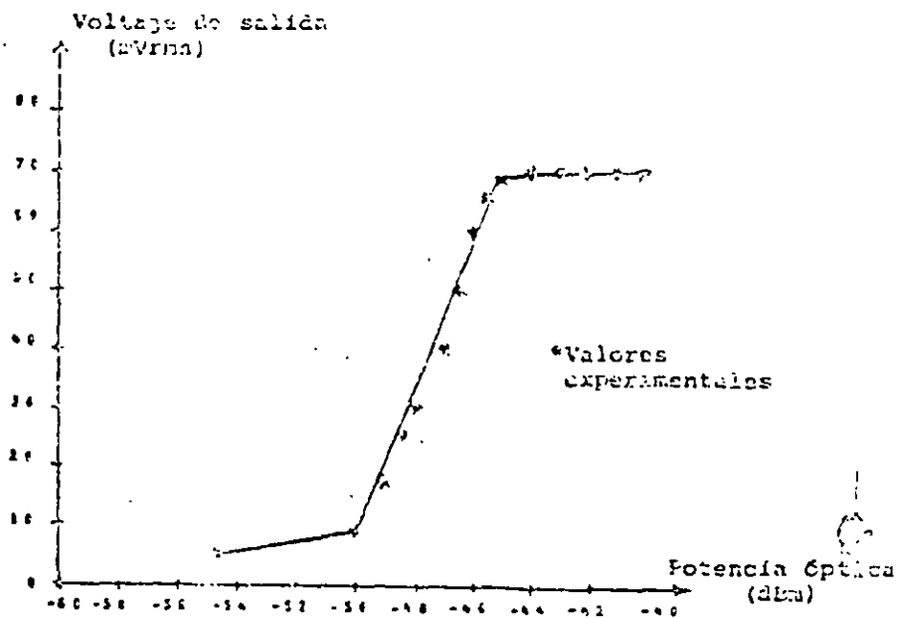


Fig 4.27.-Característica del voltaje salida como función de la 32

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: ± 2.6 mVp-p

-IMPEDANCIA DE SALIDA: 100Ω

-CARACTERISTICA AMPLITUD-FRECUENCIA PLANA: ± 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 RADIELECTRICOS.

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 :



TELECOMUNICACIONES
S.A.

TNO 4132

140 Mbit/s MULTIPURPOSE optical line terminal

TECHNICAL DATA

Line Terminal

Junction (cross connect) CMI
Code: 139, 264 Mbit/s ± 15 ppm
Loss: 12 dB max at 09, 632 MHz
Jitter: Compatible with CCITT G 703
Impedance: 75 Ω 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 ⁻⁴) - 30 dBm *	- 35 dBm (for BER 10 ⁻⁴)
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.

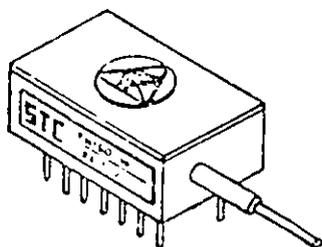
OPTICAL CHARACTERISTICS

Transmission medium: Monomode fibre or multimode graded index fibre
Source: Laser diode
Wavelength: 1.3 μm
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 μ 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 2⁷-1 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 ·	10 km (S), 15 km (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 μm, (L) shows 1.3 μm

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 ⁻¹¹)	-47.0dBm	-43.0dBm	-38.0dBm	

Optical Fiber Transmission Mode		Multi-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 (fo)	2.048 Mb/s	8.448 Mb/s	34.641 Mb/s	139.264 Mb/s		
Wavelength	1.30μm ±0.03μm					
Optical Source	InGaAsP-ILD					
Optical Detector	Ge-APD					
Line Code	Code Mark Inversion (CMI)		Scrambled Binary (Mark Ratio = 50%) (Duty Cycle = 50%)			
Link Loss Budget	Equipment	Source output power in the fiber (peak power)				+2dBm ±0.5dB
		Source output power in the fiber (average power)				-1dBm ±0.5dB -4dBm ±0.5dB
		Connection loss in the equipment				3dB
		Operating margin for the equipment				2dB
	Allowable Link Loss					40.5dB 36.5dB 33.5dB 28.5dB
Line		Connection loss between the transmitter and line				1.5dB
		Penalty for fiber bandwidth limitation (dB)				Not necessary 1.5dB
		Required fiber bandwidth (> 3dB optical)	> 8MHz	> 32MHz	> 68MHz	> 112MHz
		Operating margin for the cable				3dB
	Total line loss including splicing loss					36dB 32dB 29dB 22.5dB
	Maximum Repeater Spacing (Example: 1.3dB/km including splicing loss)					27.7km 24.6km 22.3km 17.3km

NEC



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

TRANSMISIÓN, ENLACES Y SISTEMAS DE FIBRAS ÓPTICAS

**EXPOSITOR: ING. DANIEL PINEDA C.
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

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 laser en $0.85\mu\text{m}$., sin embargo, para un laser 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.

Analicemos 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:

$$\Delta T = n_1 L/c - n_2 L/c = \frac{n_1 \Delta L}{c} \quad (2.3.1.)$$

$$\tau_m = \Delta z/L = \frac{(NA)^2}{2n_1 c} \quad (2.3.2.)$$

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 θ , con respecto a un rayo axial ($\theta=0$), se puede ver en el siguiente análisis.

Tomando la relación:

$$\frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} = \frac{\int_0^{L_0} \frac{n(r)}{c} ds}{\frac{n(0)}{c} L_0} = \frac{L}{L_0} \int_{z=0}^{L_0} \frac{n(z)}{n(0)} dz \quad (2.3.4.)$$

con:

$$n(r) = n(0) \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (2.3.4.)$$

obtenemos:

$$Z(\theta_c) = \left(1 + \frac{\sin^4 \theta_c}{4n^2 \theta_c}\right) Z(0) \quad (2.3.5.)$$

y con:

$$\Delta Z = Z(\theta_c) - Z(0) = \frac{\sin^4 \theta_c}{4n^2 \theta_c} \frac{\Delta L}{c} \approx \frac{L}{c} \frac{\sin^4 \theta_c}{4n^2} \quad (2.3.6.)$$

Tenemos:

$$\Delta Z_{\text{mod}} = \frac{\sin^4 \theta_c}{4n^2} \frac{L}{c} = \frac{n_1 \Delta^2 L}{c} \quad (2.3.7.)$$

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: —

$$n(r) = n_0^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right] \quad 0 < r < a \quad (2.4.8.)$$

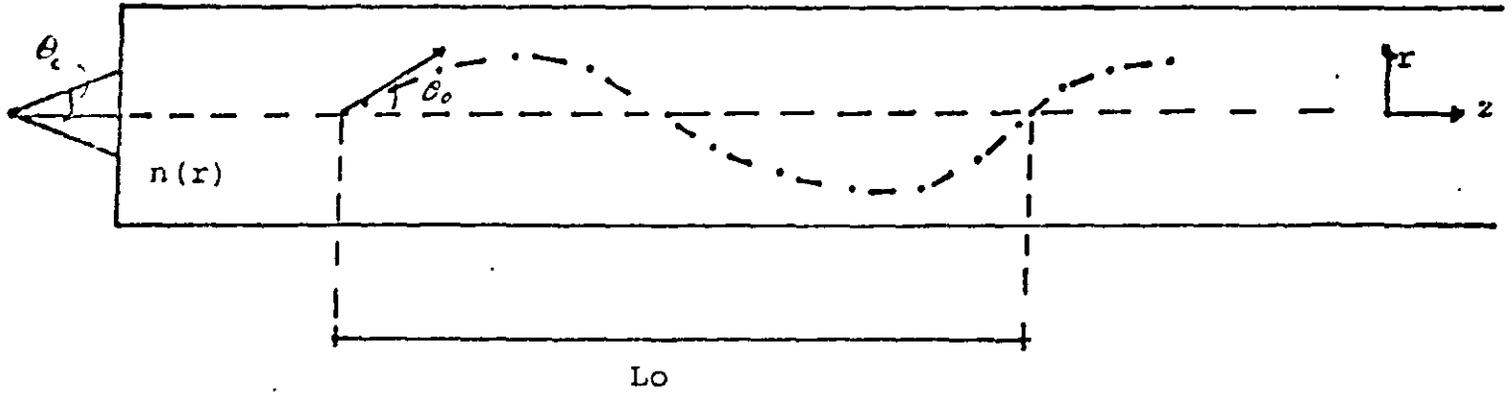
Donde n es el índice de refracción en $r=0$

y $\Delta = (n_0 - n(a))/n_0$

muestra el siguiente resultado para la dispersión modal

$$\begin{aligned} \tau(M) = \frac{LM_1}{c} \left[1 + \Delta \left(\frac{\alpha - 2 - \epsilon}{\alpha + 2} \right) \left(\frac{M}{M_1} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+2}} + \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{3\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2} \right) \left(\frac{M}{M_1} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}} \right. \\ \left. + \frac{\Delta^3}{2} \left(\frac{5\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2} \right) \left(\frac{M}{M_1} \right)^{\frac{3\alpha}{\alpha+2}} \right] + O(\Delta^4) \end{aligned} \quad (2.3.9.)$$

Dispersión Modal
Fibra Óptica de Índice gradual



Tiempo de propagación para un rayo con ángulo θ_0 en $r=0$

figura 2.3.1.

Donde:

m es la variable que identifica el orden del modo.

M es el número máximo de orden que un grupo de modos puede llevar.

$$\epsilon = \frac{2n_1 R}{m_1 \Delta} \frac{d\Delta}{dk} \approx - \frac{2\lambda}{(NA)^2} \frac{d(NA)^2}{d\lambda} \quad (2.3.10.)$$

$$y \quad m_1 = n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \quad (2.3.11.)$$

La figura (2.3.2.) muestra los perfiles de índice de refracción para varios valores de α . La figura (2.3.3.) muestra los valores del retardo en función de la variable .

Es fácil demostrar que Δz 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 λ 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 λ 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 λ puede relacionarse con la longitud de onda central de la fuente λ_0 mediante una expansión en series de Taylor:

$$z(\lambda) = z(\lambda_0) + (\lambda - \lambda_0) \left. \frac{dz}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} + \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2} \frac{d^2z}{d\lambda^2} \dots (2.3.17.)$$

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:

$$\frac{1}{c} \frac{dm_1}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} = M_1(\lambda) \quad (2.3.18.)$$

La gráfica de la figura (2.3.5.) muestra los valores de M_1 para 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 μm . y 1.39 μm .

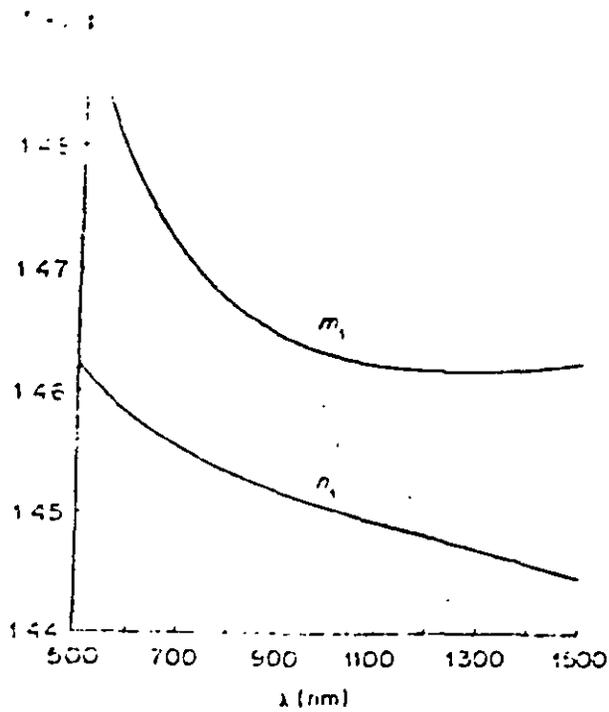


Figura (2.3.4).- Variación de n_1 y m_1 en las longitudes de onda de interés.

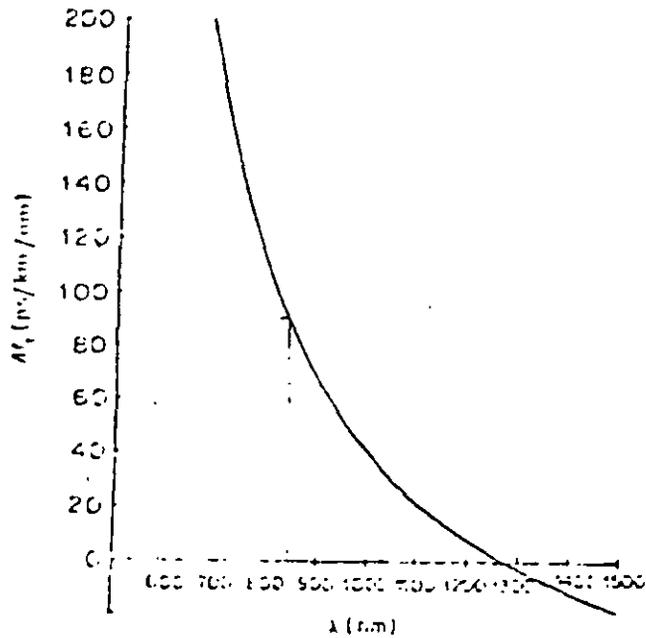


Figura (2.3.5).- Variación de M_1 en función de la longitud de onda.

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:

$$\tau = \frac{2L n_1}{c \sin \theta} \quad (2.3.19.)$$

Si cambia la longitud de onda de trabajo debe cambiar aunque n_1 permanezca constante. La razón es que el ángulo θ cambiaría. En efecto de la teoría modal sabemos que solo ciertos ángulos discretos de propagación θ_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.

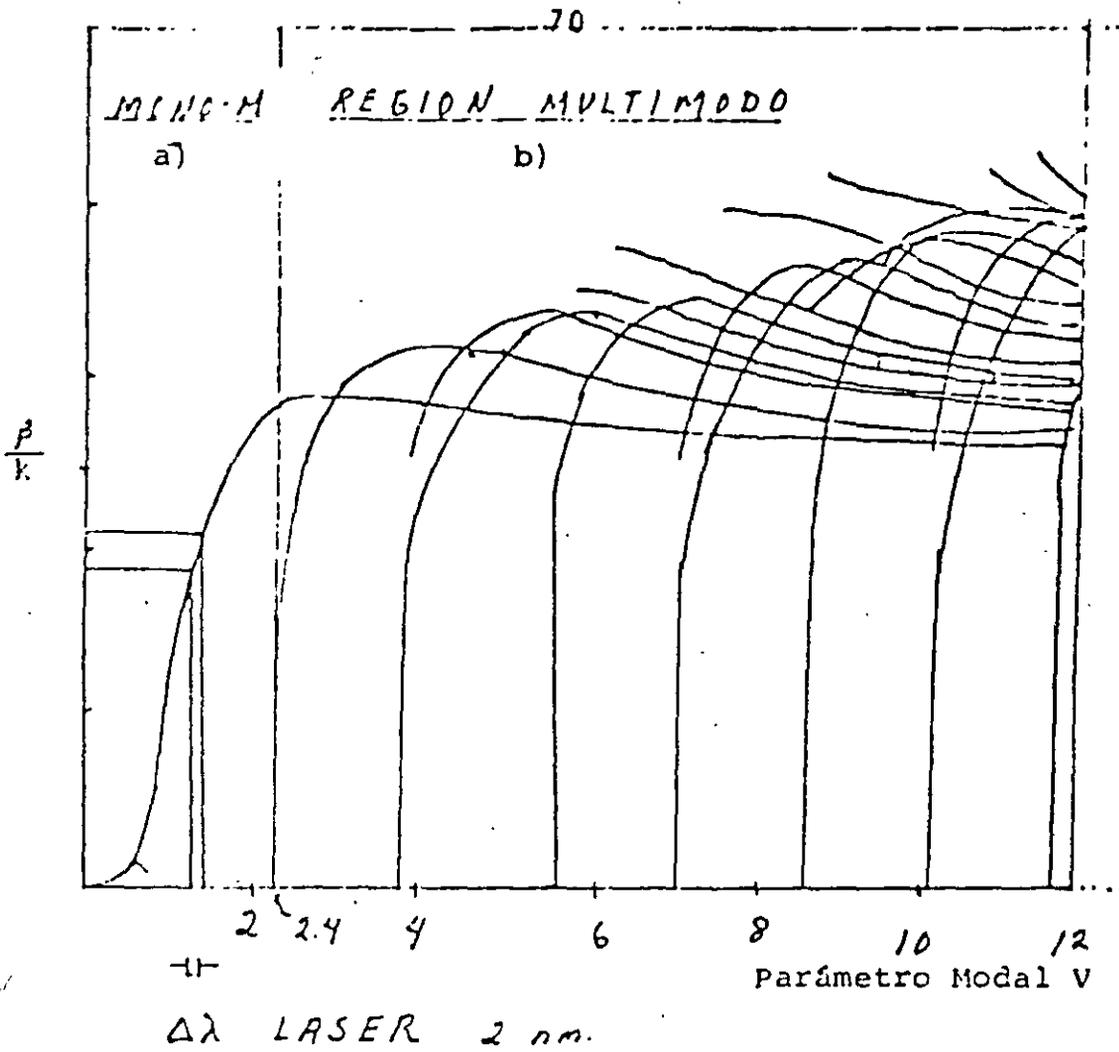


Figura (2.3.6).- Regiones de propagación. a) Monomodal y b) Multimodal.

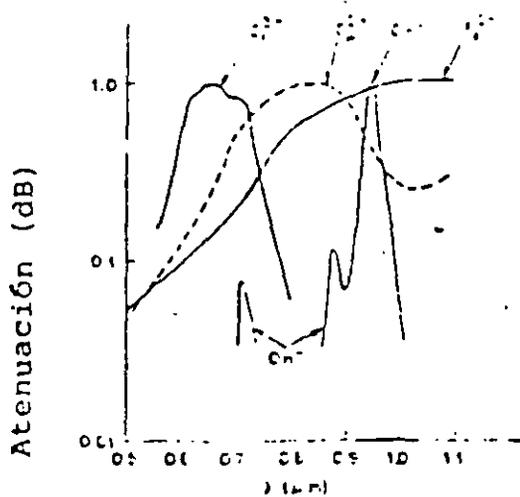


Figura (2.3.7).- Bandas de absorción de diferentes impurezas.

- 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 λ de transmisión. La absorción en el ultravioleta está relacionada con resonancias atómicas del oxígeno y cambia de acuerdo a la composición del

vidrio.

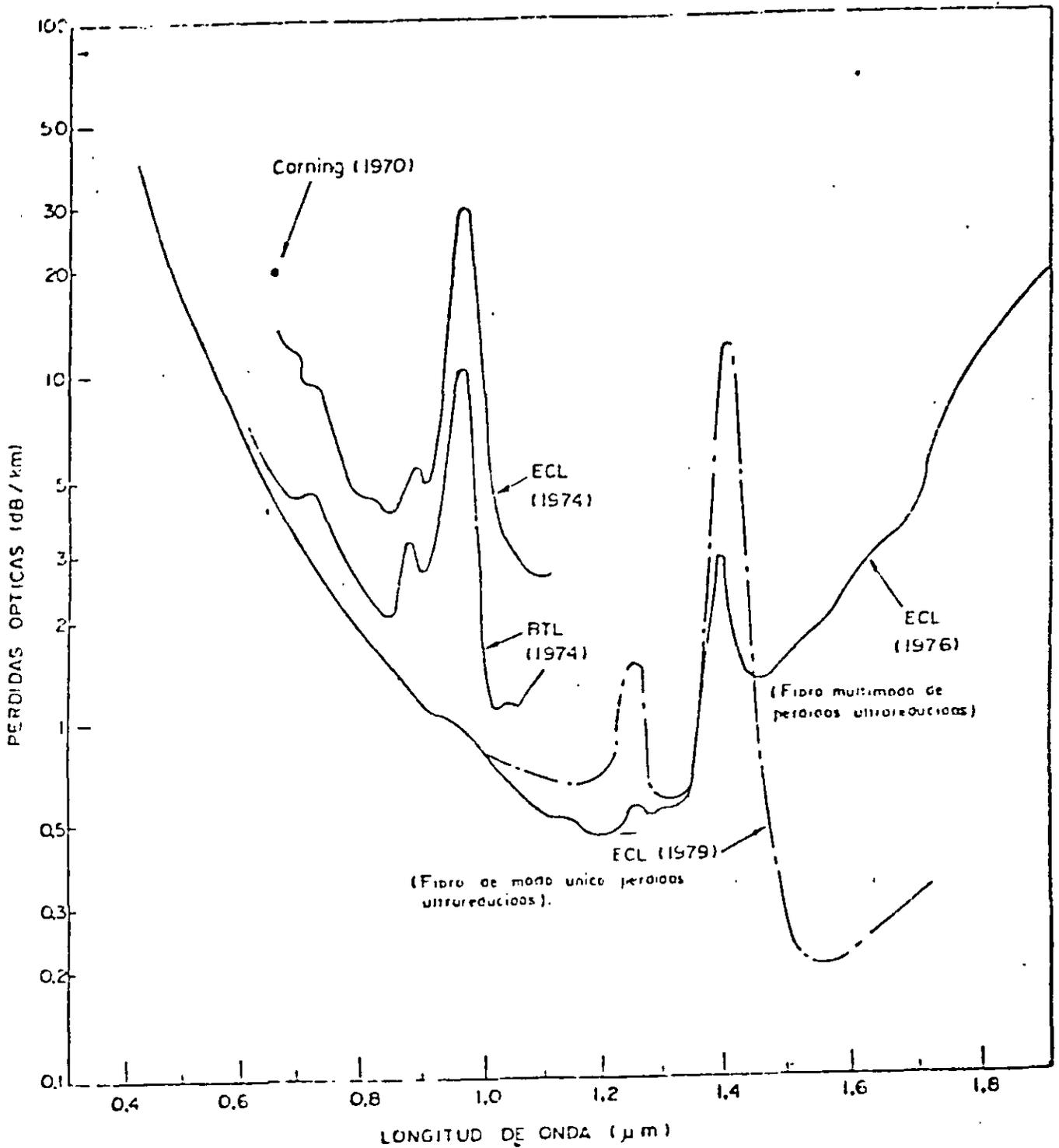
La absorción por impurezas se debe básicamente de la presencia de iones metálicos tales como hierro, cobalto y cromo. La absorción de estos iones varía de vidrio a vidrio dependiendo del estado de Valencia del ion. Introduciendo cantidades fijas de la impureza en un tipo de vidrio dado y calculando las 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 Cr^{3+} , Cu^{2+} , y 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 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 OH^- entre los fabricantes ha fijado límites de atenuación significativos en las regiones de 1.1-1.2 μm , 1.3 μm y 1.5 a 1.7 μm , con un mínimo absoluto de 0.16 dB/Km obtenido en 1.5 μm , 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.

$$L = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1) K T B \quad (2.3.20)$$

Donde: K = es la constante de Boltzman

T = es la temperatura

y B = la compresibilidad

Para la dispersión por fluctuación de densidad

$$L = \frac{16\pi^3 n}{3\lambda^4} \left(\frac{\partial n}{\partial c} \right)^2 \overline{\Delta c^2} \delta V \quad (2.3.21)$$

Donde: $\overline{\Delta c^2}$ = es la fluctuación de concentración media cuadrática

y δV = 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 Raleygh. 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 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

Dañadas 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

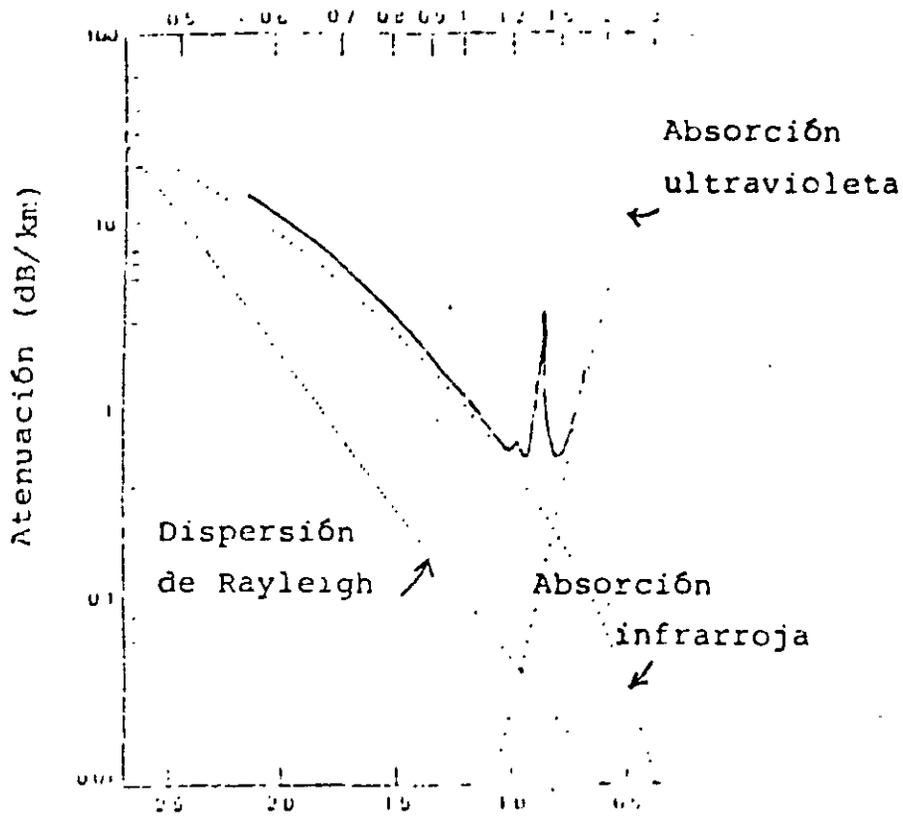


Figura (2.3.9).- Descomposición de pérdidas en absorción y dispersión.

TYPICAL SPECTRAL ATTENUATION RANGE: MG05 FIBER

ATTENUATION (dB/km)

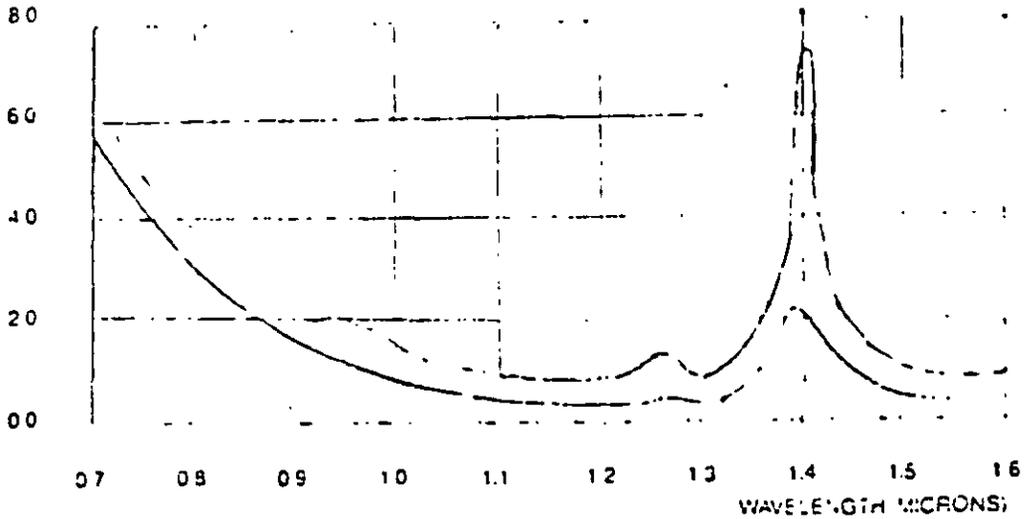
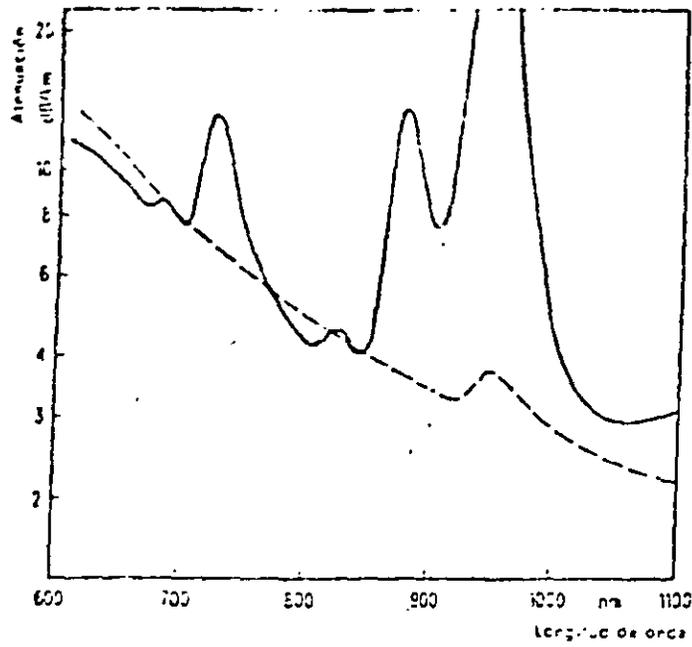


Figura (2.3.10).- Atenuación índice gradual. (VALTEC)



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)

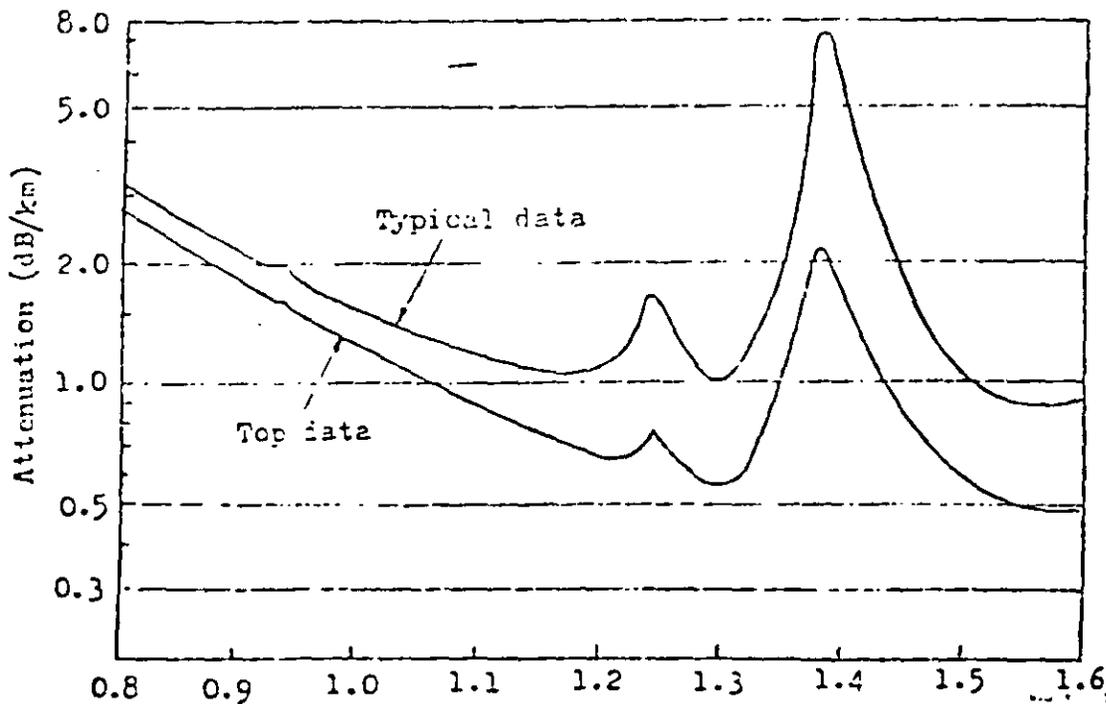
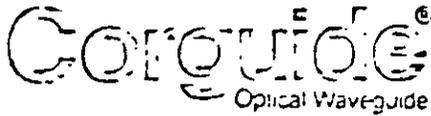


Figura (2.3.12).- Atenuación índice gradual (SUMITOMO)

JING

Telecommunications Products Department
Corning Glass Works
Corning, New York 14831
Tel: (607) 974 4411
Telex: 952499 (USA)



Single Mode Fiber/SMF

SMF PRODUCTS FOR EXPERIMENTAL APPLICATIONS

Attenuation	λ_c	Price per meter (US \$)	
		1-10 km	10-100 km
4.0 dB/km @ 850 nm	< 600 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	< 1450 nm	4.75/m	4.00/m

Core Diameter: 4-12 μm
Clad Diameter: 125 μm
Coating: CPC (250 μm 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 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 es el retardo correspondiente al modo n.

Cuando el número de modos es muy grande se puede substituir la sumatoria por una

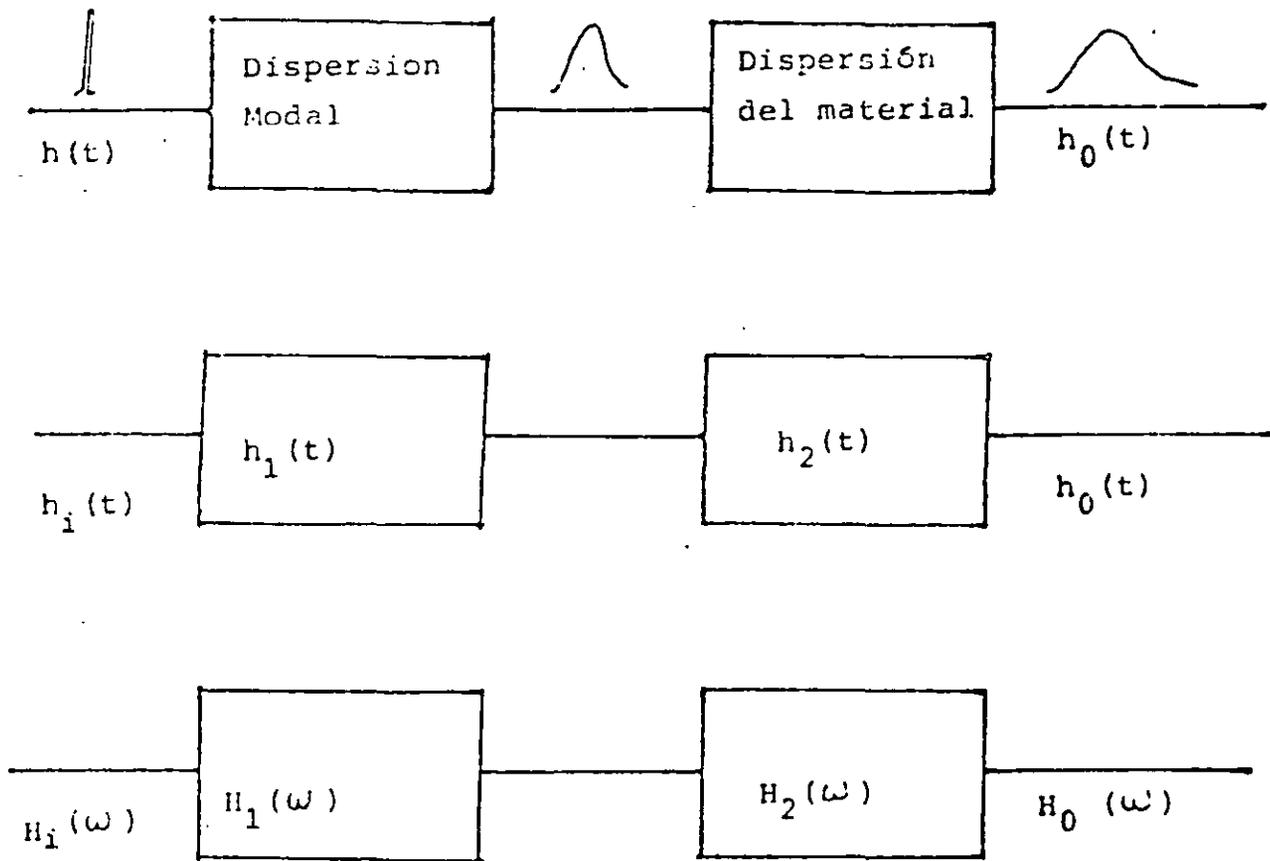


Figura (2.3.14).- Procedimiento de análisis de ancho de banda.

$$P_0 = P_n(\tau) = h_1(t) \iff H_1(\omega) \quad (2.3.23)$$

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 τ_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:

$$H_1(\omega) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j\omega t} dt = \frac{2 \sin(\pi \tau f)}{2\pi \tau f} \quad (2.3.25)$$

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 corriente.

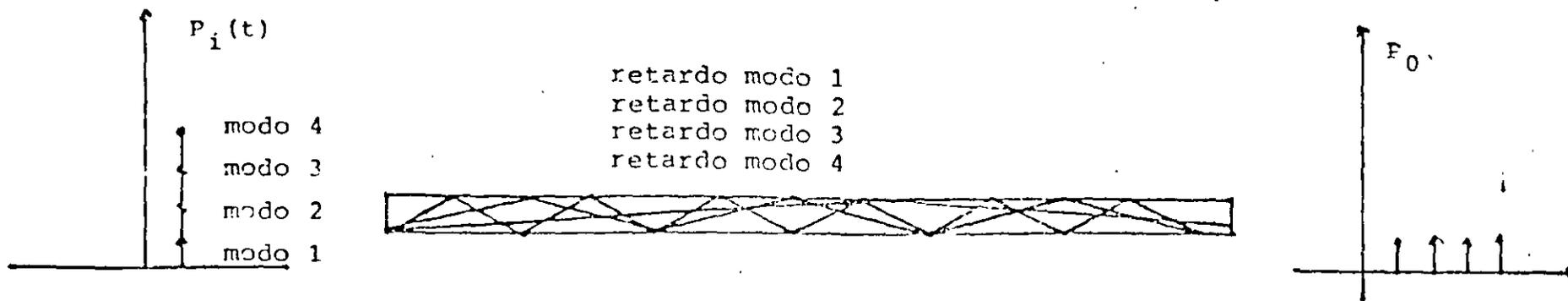


Figura (2.3.15).- Espaciamiento de impulsos modales

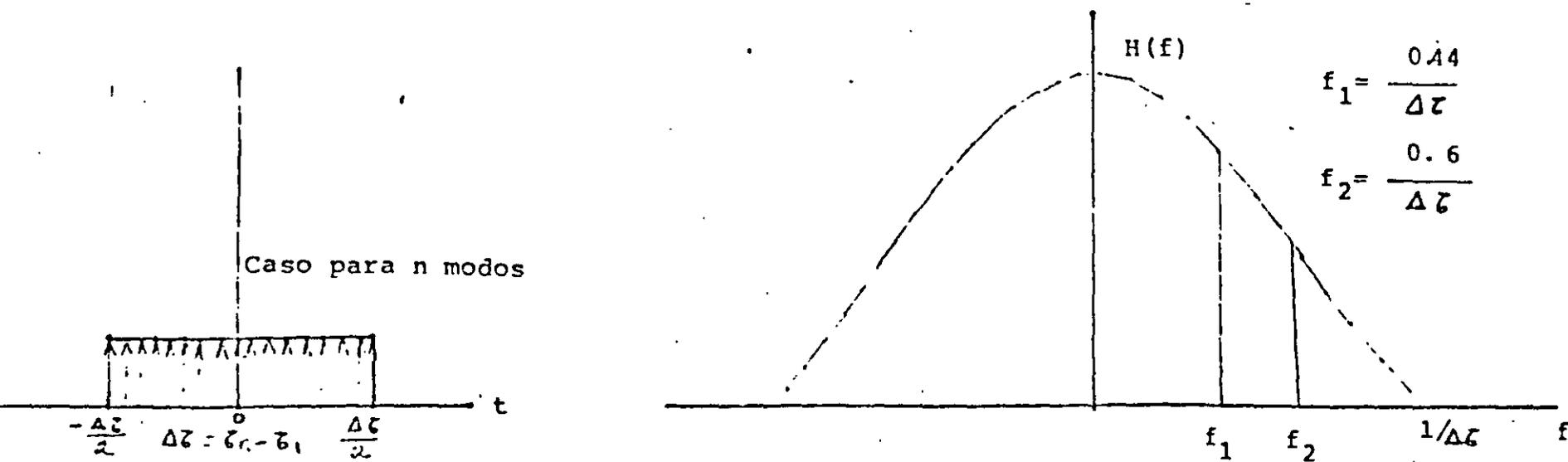


Figura (2.3.16).- Aproximación de la dispersión modal mediante un pulso rectangular de ancho Δz y su transformada de Fourier, indicando f_1 (3 dB eléctricos) y f_2 (3 dB ópticos).

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:

$$\sigma_{m_e} = \frac{L_1 \eta_1 \Delta}{2 c \sqrt{3}} \quad (2.3.26)$$

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:

$$\sigma_{m_o} = \frac{L \eta_1 \Delta^2}{20 c \sqrt{3}} \quad (2.3.27)$$

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 $H_2(\omega)$.

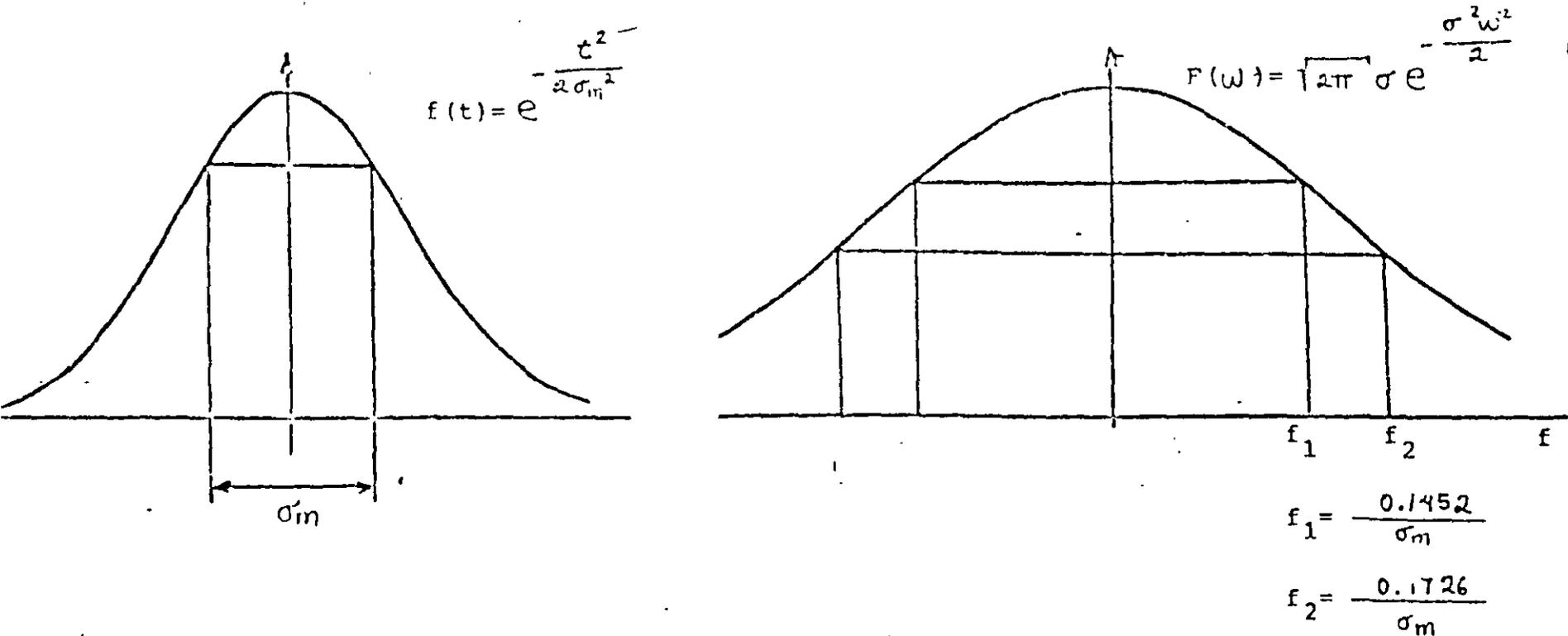


Figura (2.3.17).- Modelo Gaussiano para la dispersión intermodal.

$\sigma_m = \frac{L n_1 \Delta}{2c \sqrt{3}}$ para la fibra de índice escalonado (~ 14.0 ns)

$\sigma_m = \frac{L n_1 \Delta^2}{20c \sqrt{3}}$ para la fibra de índice gradual óptima (~ 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 λ_0 ; su fórmula será:

$$S(\lambda) = S(\lambda_0) \exp^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma_s} \right)^2} \quad (2.3.28)$$

normalizando $S(\lambda)$ tenemos:

$$\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda = 1 \quad (2.3.29)$$

λ_0 será

$$\lambda_0 = \int_0^{\infty} \lambda S(\lambda) d\lambda \quad (2.3.30)$$

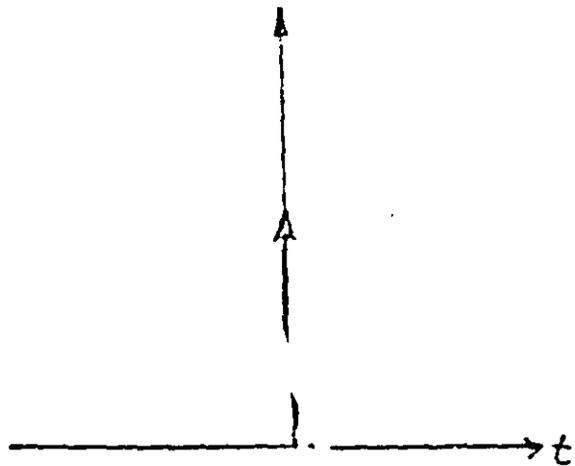
y σ_s será

$$\sigma_s = \left[\int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_0)^2 S(\lambda) d\lambda \right]^{1/2}$$

De la teoría sabemos de un rayo de luz a una longitud de onda λ_0 y con un pequeño ancho espectral $\delta\lambda$ tendrá una dispersión alrededor de λ_0 , en la fibra dada por:

$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \delta\lambda \quad (2.3.31)$$

$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda_0}{c} n''(\lambda_0) (\lambda - \lambda_0) \quad (2.3.32)$$



$$\tau(\lambda) = L \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

$$\tau(\lambda) \Delta\lambda = L \frac{\lambda_0}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda = \lambda_0} \delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

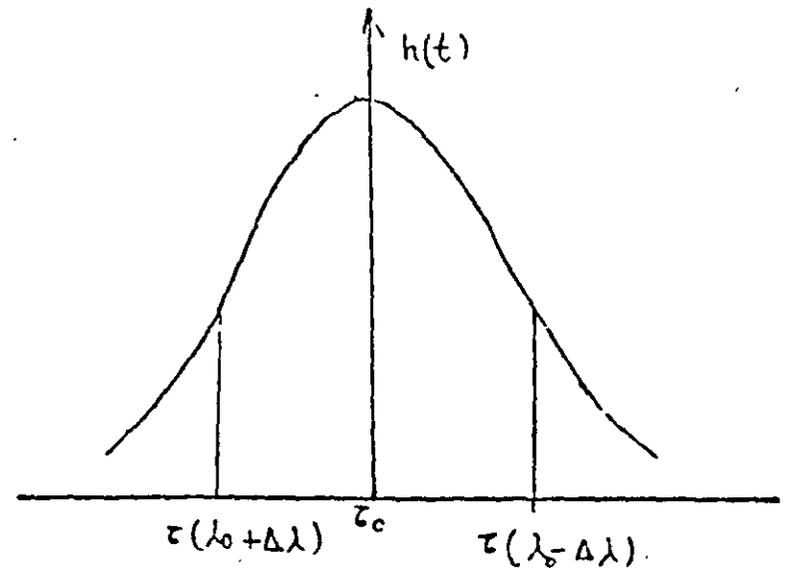
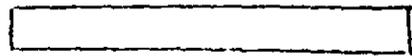
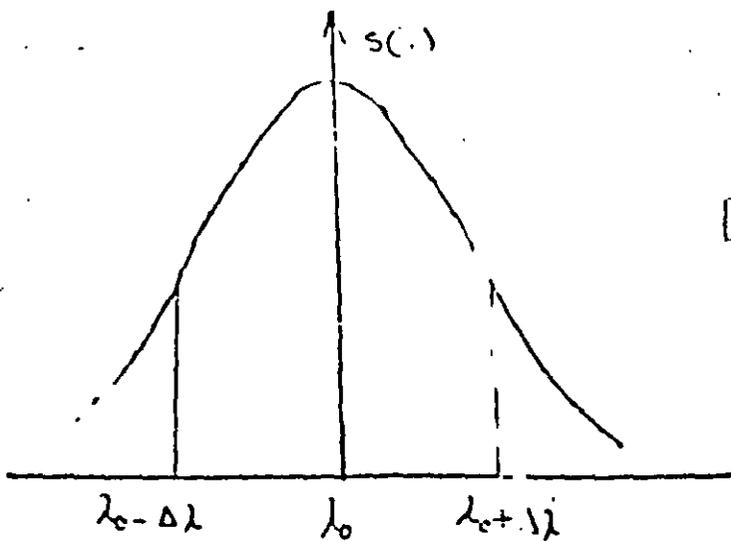


Figura (2.3.18).- Respuesta temporal de una fibra a una excitación con espectro $s(\lambda)$.

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 .

$$h_2(t) = S\left(\frac{t - \Delta\lambda}{\tau_m}\right) \Leftrightarrow S(\lambda - \lambda_0) \quad (2.3.33)$$

donde

$$\tau_m = L \frac{\lambda_0}{c} \left. \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right|_{\lambda_0} \delta\lambda = L M(\lambda_0) \delta\lambda \quad (2.3.34)$$

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 λ_0 en que la respuesta cae a 1/2 de su valor en λ_0 , respecto a esa medida:

$$\tau_s = 0.4247 \Delta\lambda_{1/2} \quad (2.3.35)$$

y para la dispersión temporal resultante τ_c (c de cromática)

$$\tau_c = \tau_s M = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \tau_s \quad \text{ns/km} \quad (2.3.36)$$

La figura (2.3.19) muestra la respuesta al impulso y su transformada de Fourier $H_2(\omega)$ para un laser semiconductor en $0.85\mu\text{m}$. con $\Delta\lambda = 2\text{nm}$,

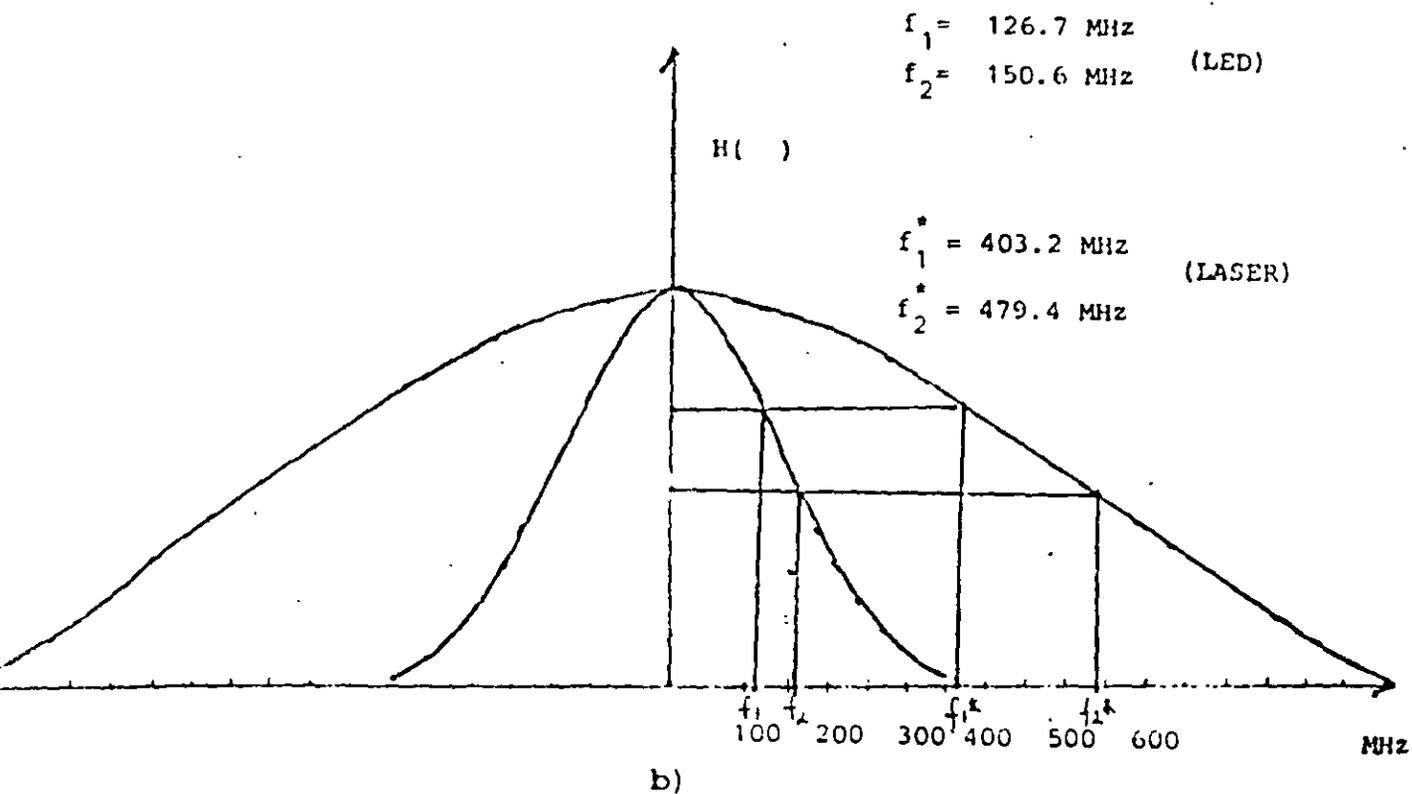
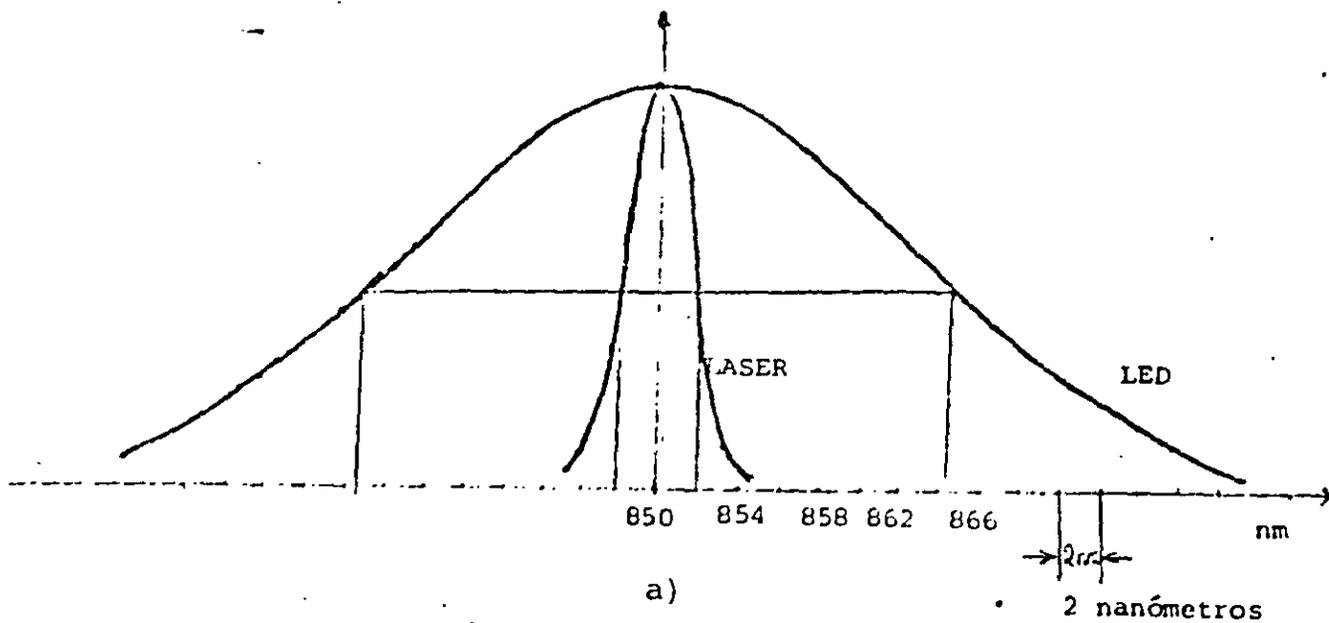


Figura (2.3.19).- Ancho espectral (a) y ancho de banda (b) para un LASER y un LED típicos.

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 σ_T dada por:

$$\sigma_T = \sigma_m^2 + \sigma_c^2 \quad (2.3.37)$$

Donde

σ_m = es la dispersión modal

σ_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 microdoblecés 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, γ 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:

$$\sigma_T = \sum_{k=1}^N \sigma_k \quad (2.3.40)$$

σ_k denota la dispersión modal de cada fibra y σ_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

$$\sigma_T^2 = \sum_{k=1}^N \sigma_k^2 + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{q=1}^N \sigma_p \sigma_q \gamma_{pq} \quad (2.3.42)$$

Donde

γ_{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=3Km.

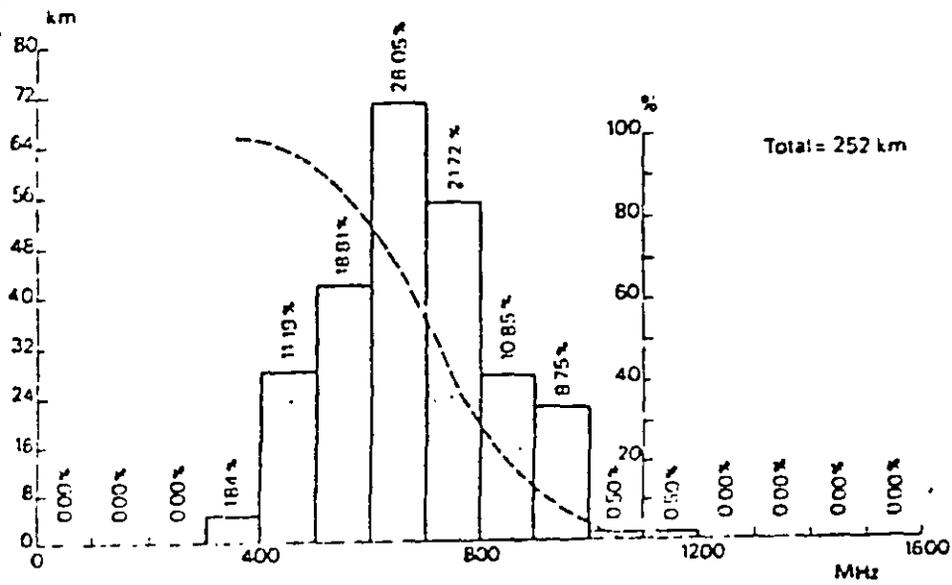


Figura (2.3.20).- Ancho de banda. Histograma.

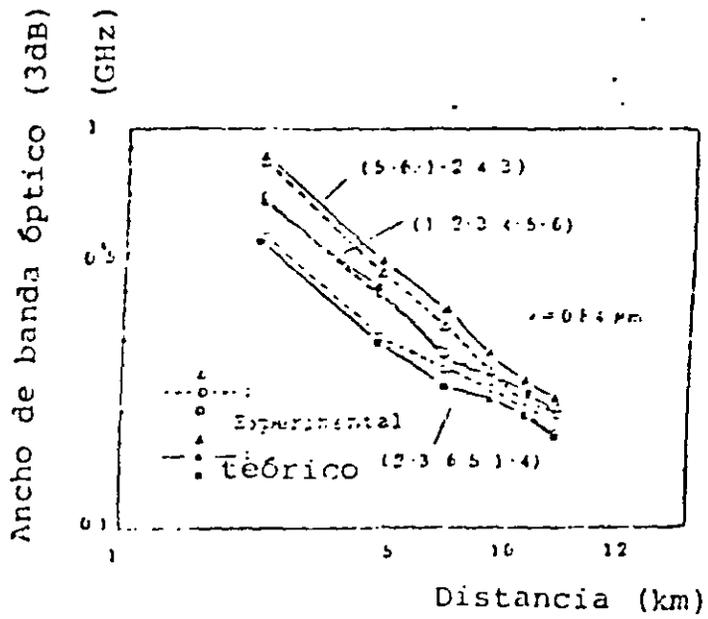
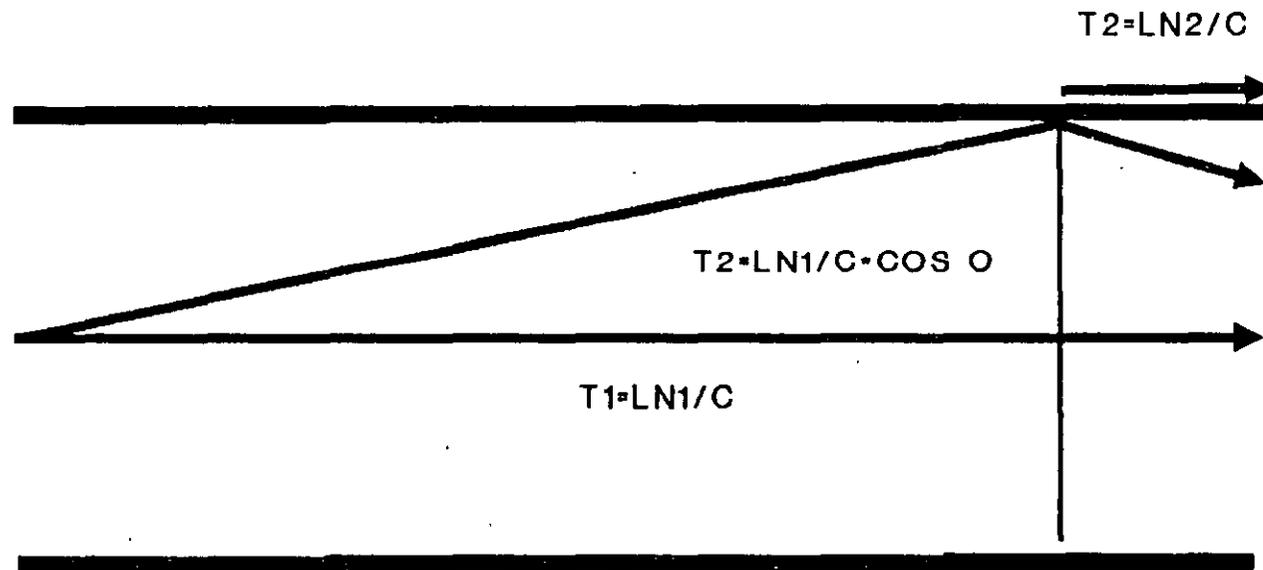


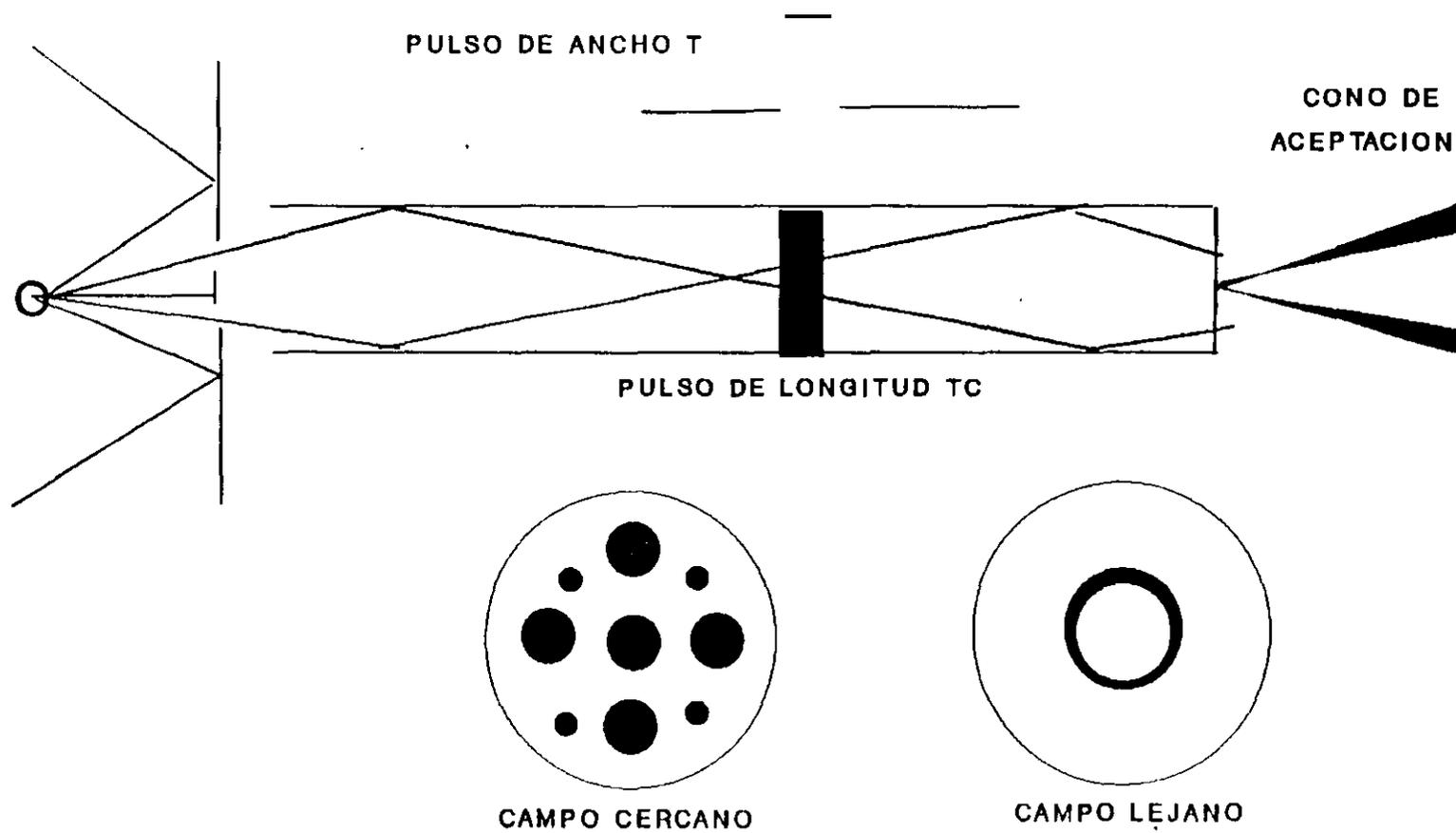
Figura (2.3.21).- Variación del ancho de banda total cuando se cambia el orden de las fibras concatenadas.

DISPERSION INTERMODAL FIBRA MULTIMODO

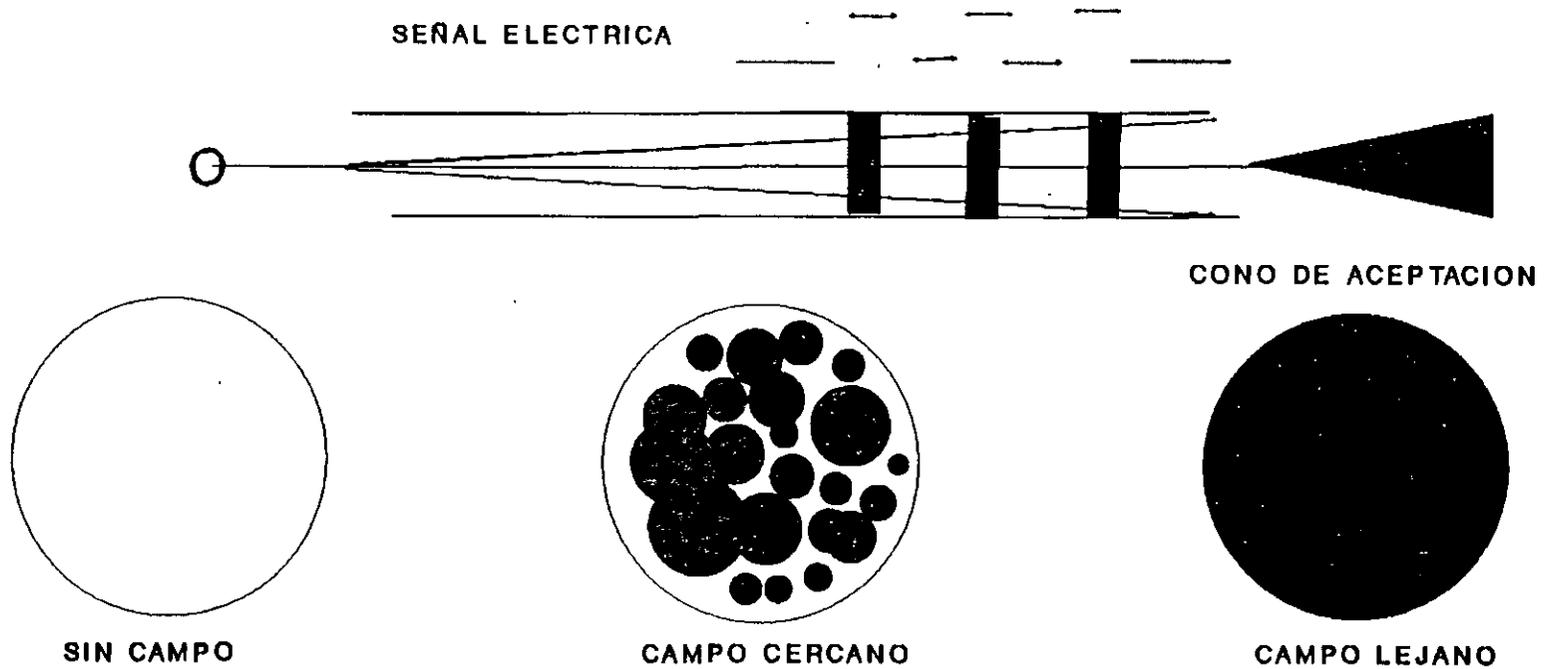


$$T_2 - T_1 = LN_1/C(1 - 1/\cos \theta) = L/C(N_1 - N_2) = LN_1 / C$$

PROPAGACION F.O. MULTIMODO RESTRICCION A UN SOLO MODO

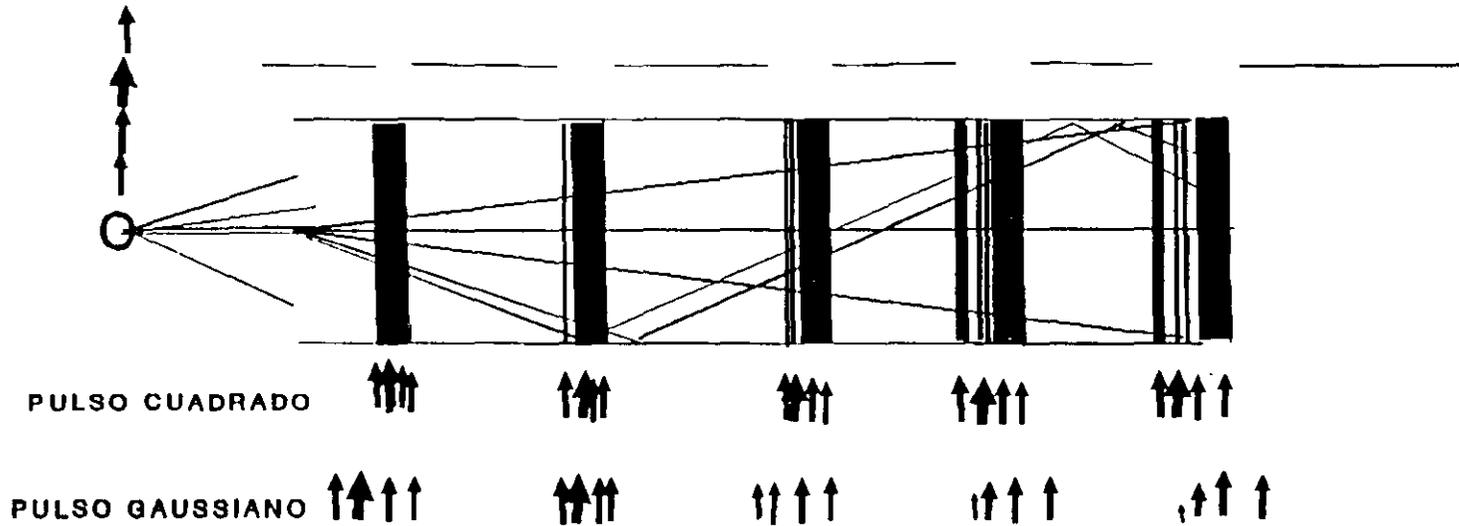


PROPAGACION F.O. MULTIMODO EFECTO GLOBAL



DISPERSION INTERMODAL F.O. DE INDICE ESCALONADO

ENSANCHAMIENTO DEPENDIENTE DE LA DISTANCIA

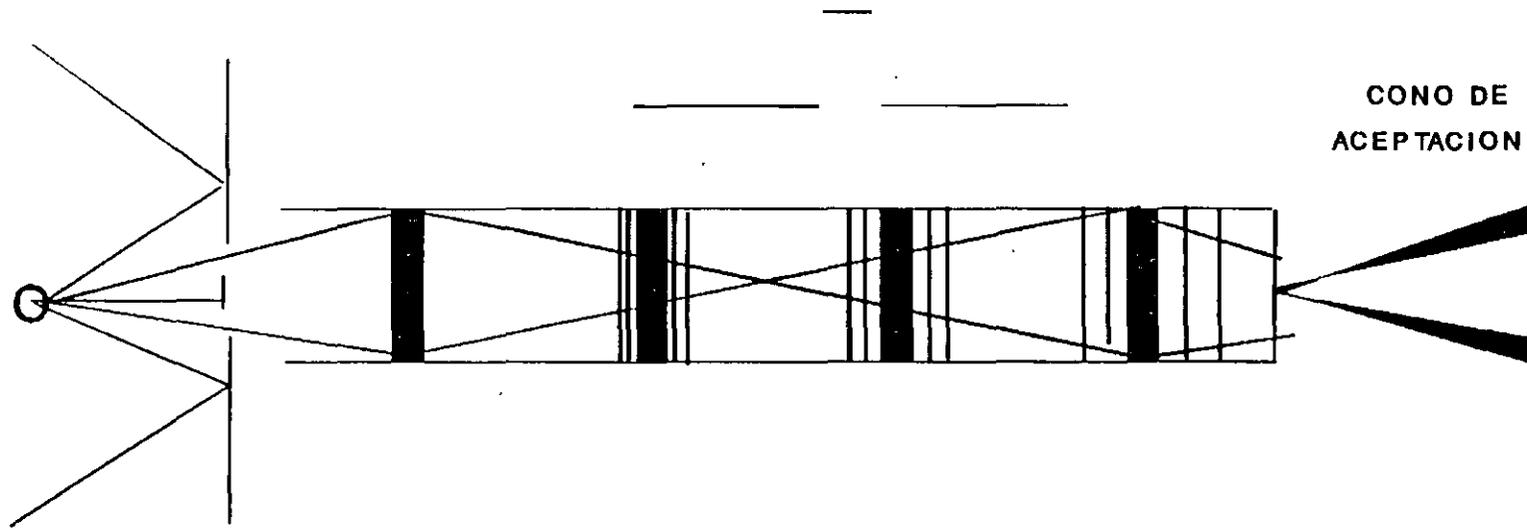


$$\text{FACTOR DE DISPERSION I. M.} = (L/C) \cdot (N_1 - N_2) = Q$$

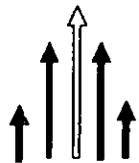
$$\text{PARA EL PULSO CUADRADO } T = \sqrt{Q \cdot t/2}$$

$$\text{PARA EL PULSO GAUSSIANO } F(t) = \text{EXP}(t^2 / 2Q^2)$$

DISPERSION CROMATICA PARA UN SOLO MODO



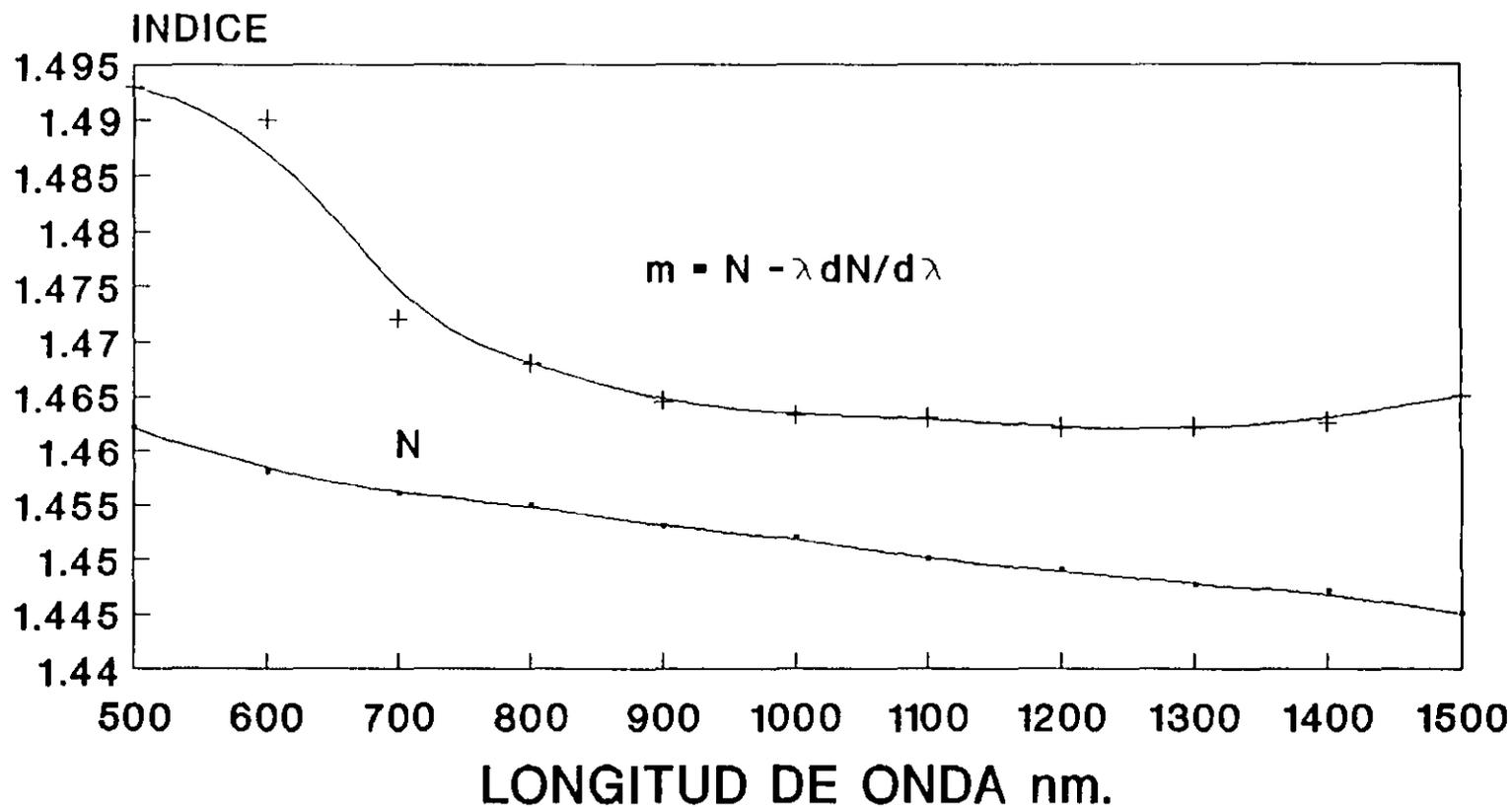
VELOCIDAD DE PROPAGACION EN FUNCION DE λ



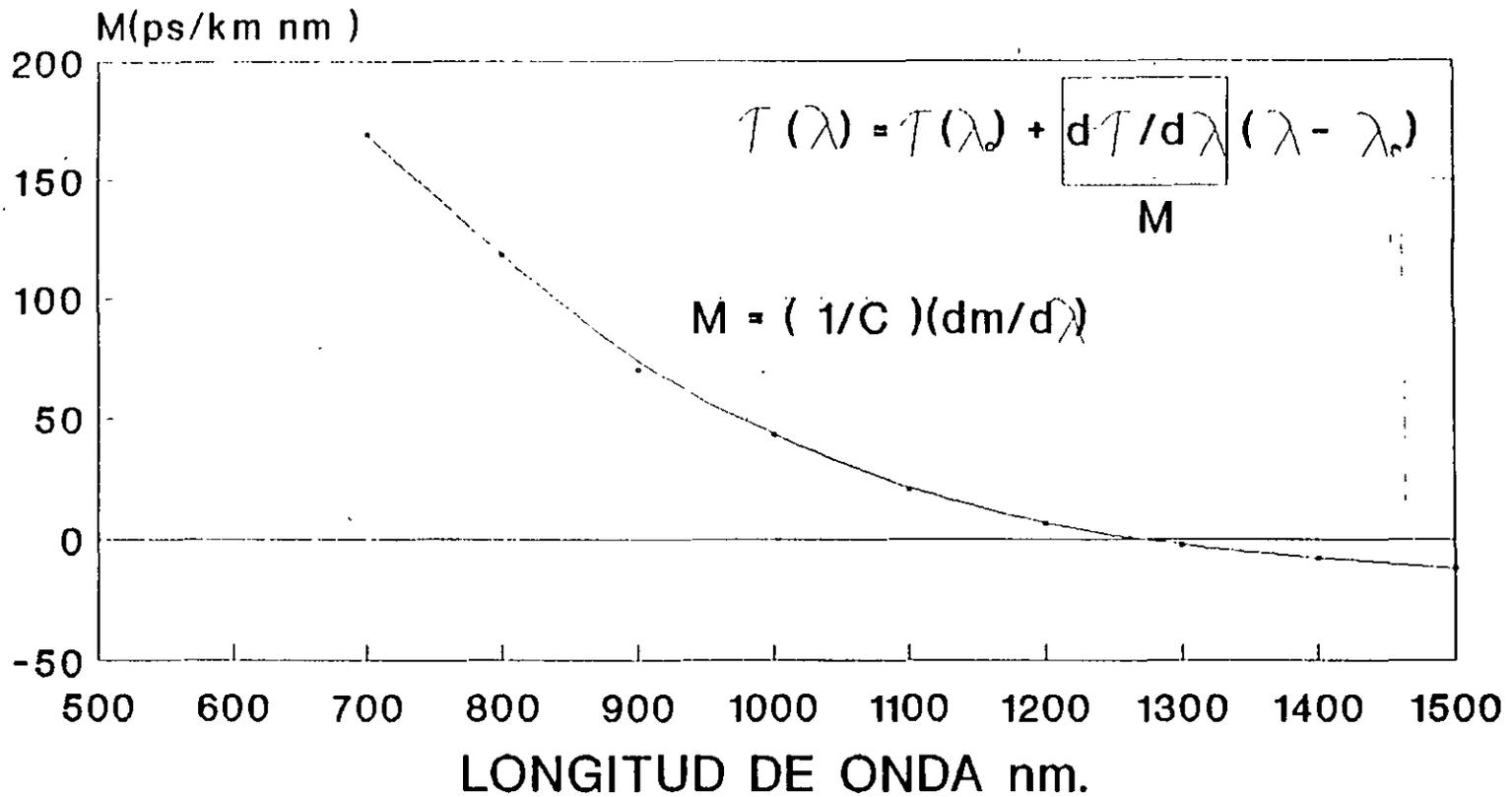
COMPOSICION

ESPECTRAL DELA FUENTE

VARIACION DEL INDICE DE REFRACCION m Y n EN FUNCION DE LA LONG. DE ONDA

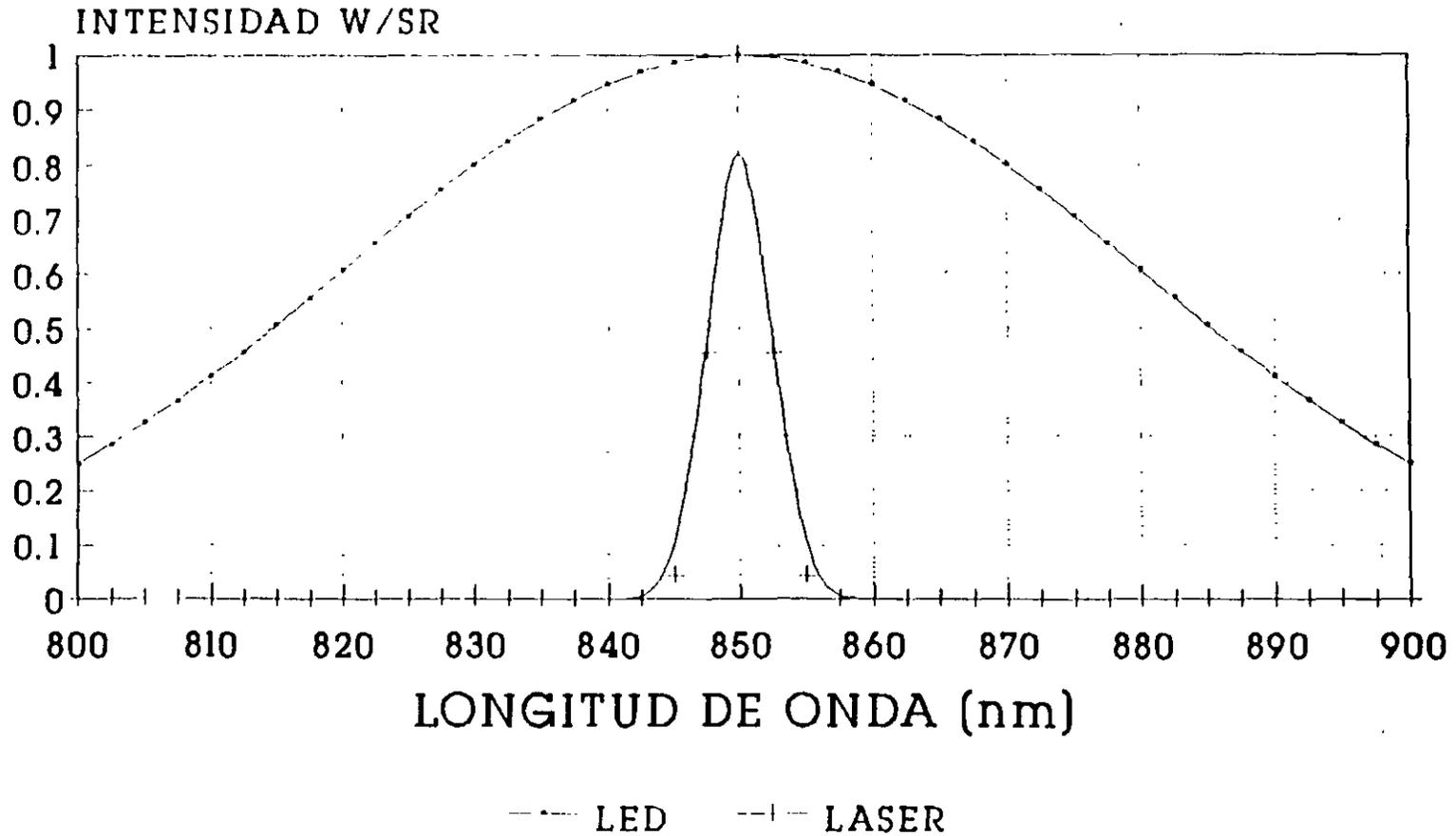


FACTOR DE DISPERSION DEL MATERIAL EN FUNCION DE LA LONG. DE ONDA

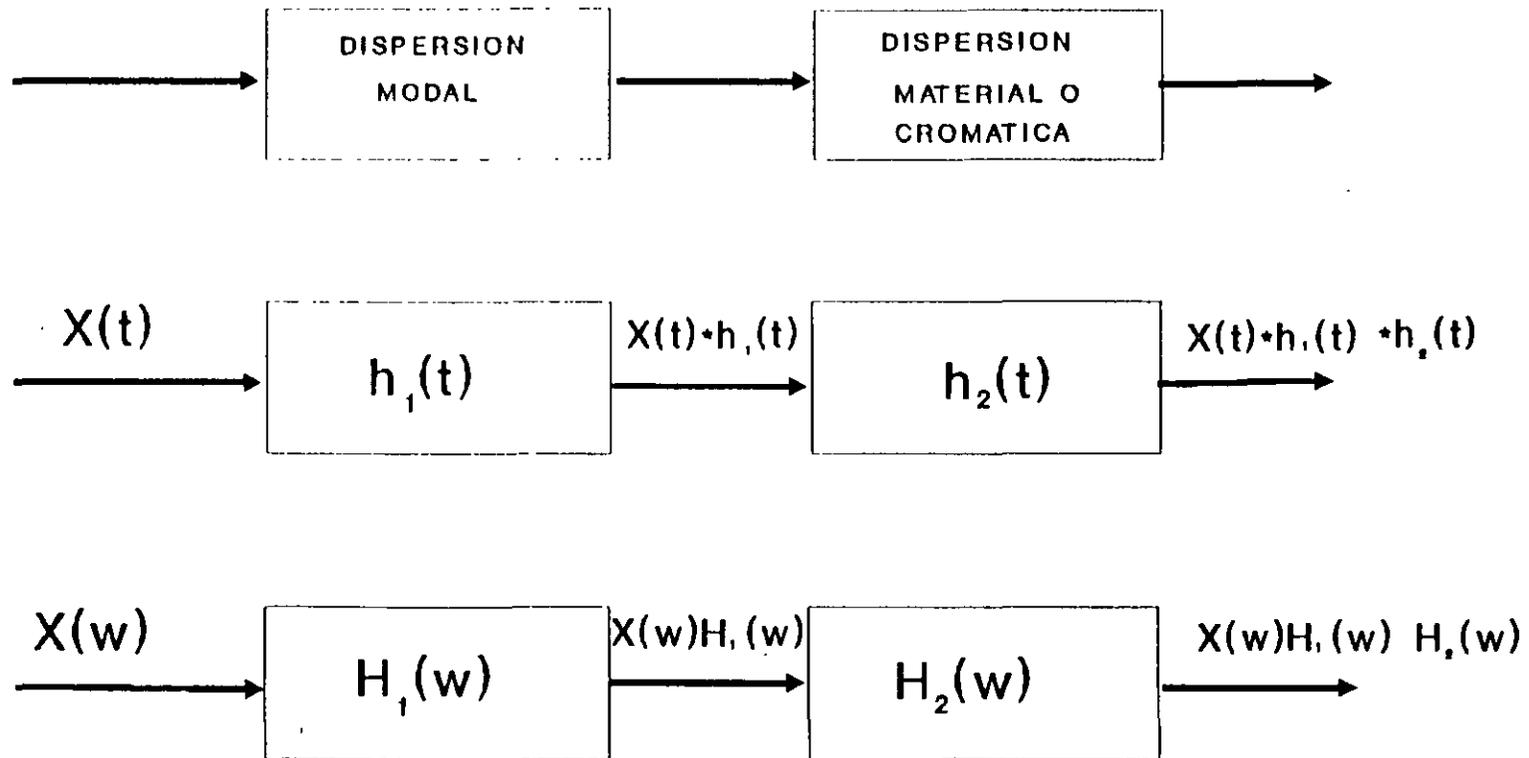


--- M

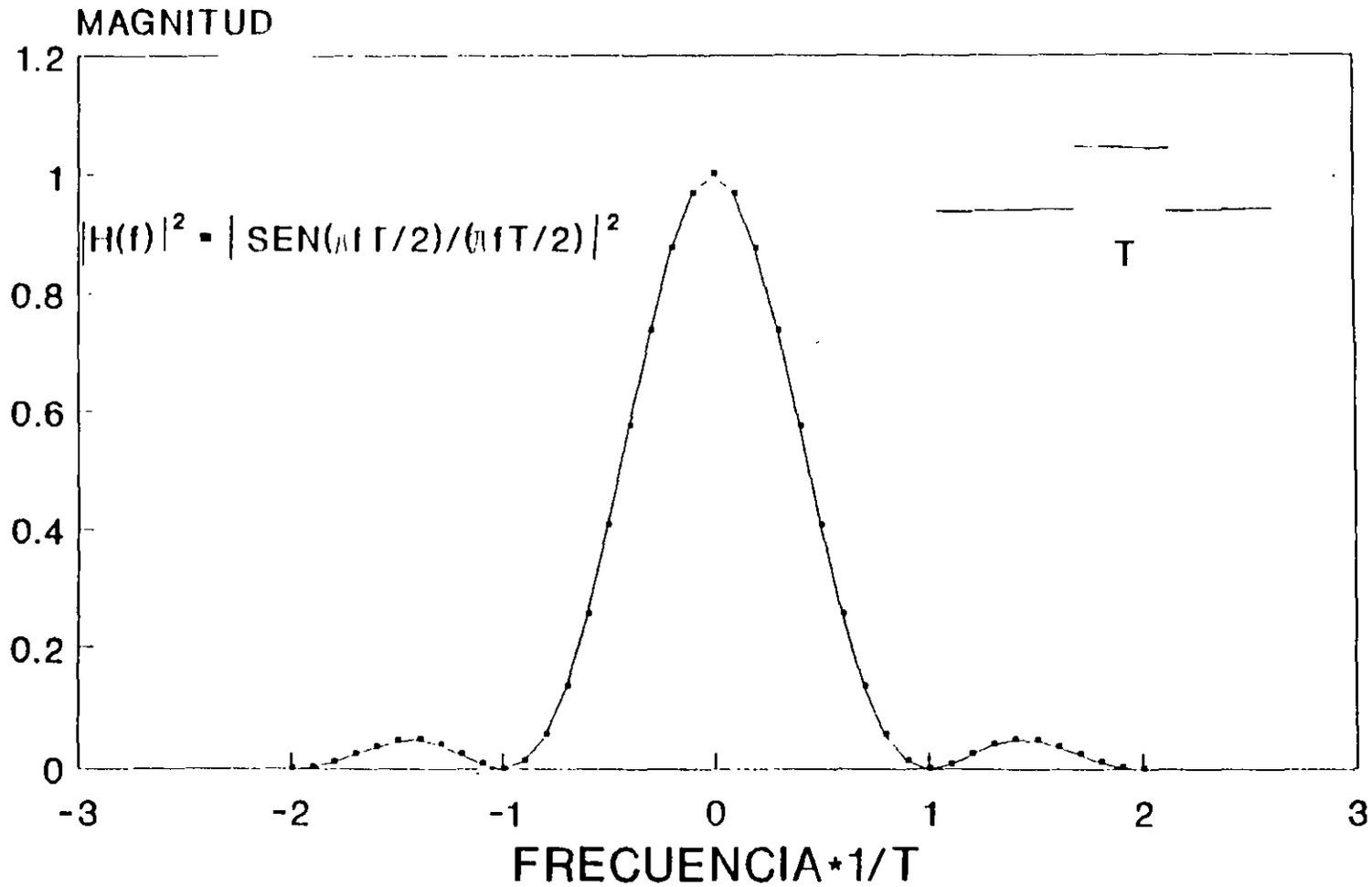
ESPECTRO DE EMISION DIODO LASER Y LED



MODELO PARA EL ANALISIS ANCHO DE BANDA

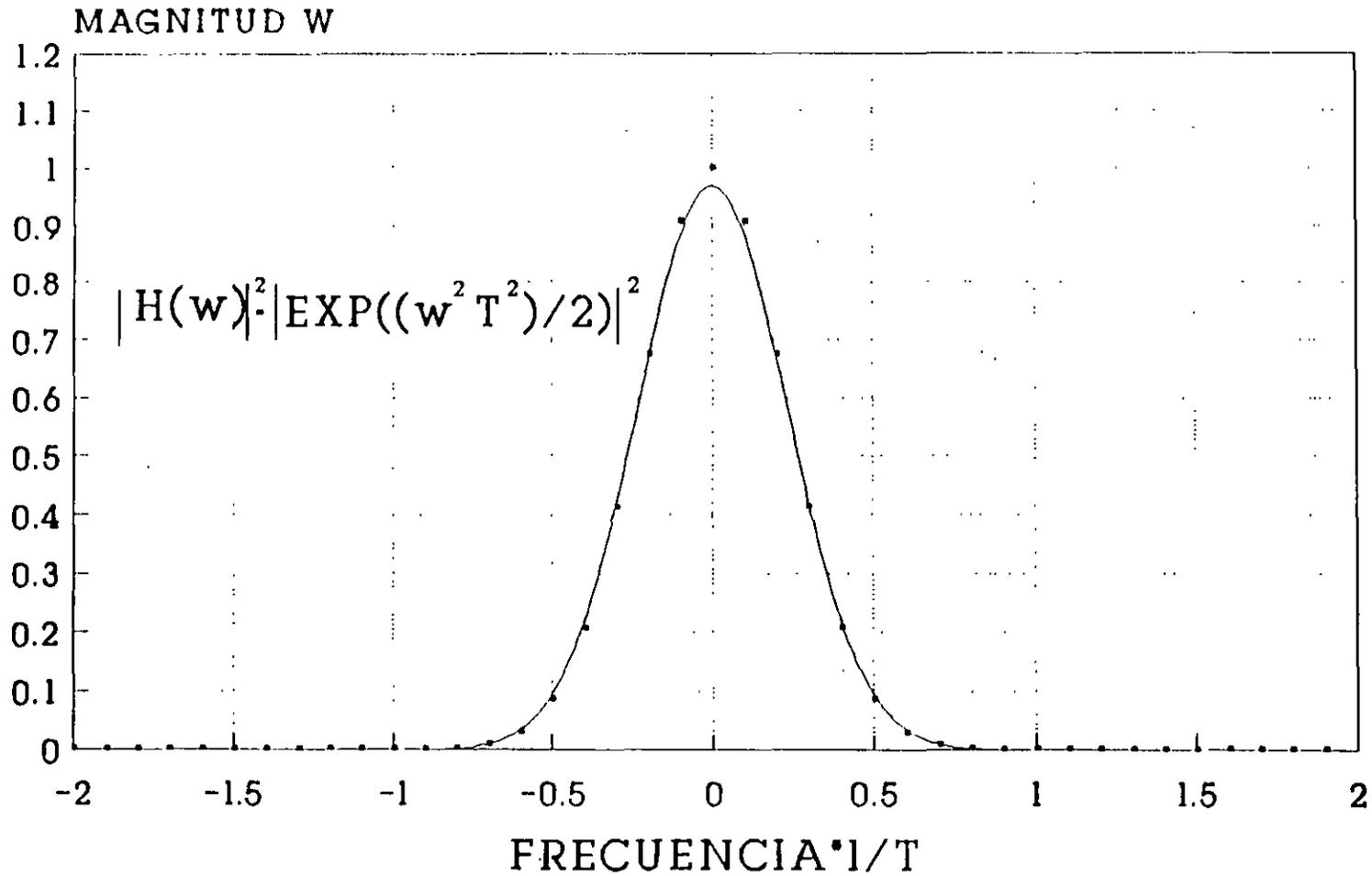


RESPUESTA EN FRECUENCIA PULSO CUADRADO DE SALIDA



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, cuales 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 vídeo, 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 ($l < 1\text{km}$)
- media distancia ($1\text{km} < l < 30 \text{ km}$)
- larga distancia ($l > 30 \text{ km}$)

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 Principales

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:

$$\alpha L + kaj = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (1)$$

donde:

α es la atenuación en la fibra (dB/km)

aj 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 espaciamiento entre repetidores. Este límite de dispersión puede ser estimado por la ecuación:

$$\sigma_{tot} L = 0.25 T = \frac{1}{4f_0}$$

donde:

σ_{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:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{mod}^2 + \sigma_{crom}^2 \quad (3)$$

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 Óptico
- 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 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 precedentes, 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 Óptico.

En la figura (4) se muestra un diagrama de flujo para el proceso de diseño en el subsistema receptor. Primeramente, el usuario de fine el tipo de información que va a manejarse, ya sea analógica- c 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:

$$\alpha L + k a_j = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$\alpha = 5 \text{ dB/km}$$

$$L = ?$$

$$K = ?$$

$$a_j = 0.5 \text{ dB}$$

$$K = \text{número de empalmes} = \frac{L}{10}$$

$$f_{lim} = \frac{11 \times 1}{4 \times 2 \times 10^{-9} \times 50}$$

$$f_{lim} = 27.5 \text{ Mbd.}$$

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, $\lambda = .9 \mu\text{m}$, $P_1 = 3.91 \text{ dBm}$; $\sigma_{tot} = 4 \text{ ns/km}$

Sensitividad del receptor: -71.42 dBm

Solución:

Para determinar si el enlace está limitado por atenuación o por dispersión se utiliza la expresión 4.

$$\log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = 50 \text{ dB.}$$

$$\alpha L + \frac{L}{10} a_j = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$L \left(\alpha + \frac{1}{10} a_j \right) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$$

$$L = \frac{10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right)}{\alpha + \frac{1}{10} a_j}$$

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 : $P_1' - P_2 = 56.70 \text{ dBm}$

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,

$$a_j = 0.3 \text{ dB (9 empalmes)} \quad a_{jK} = 2.7 \text{ dB}$$

$$\text{Margen de Tolerancia} \quad K_r = 5.0 \text{ dB}$$

$$\alpha L + a_{jK} + K_r = 56.7 \text{ dB}$$

$$\text{Distancia entre repetidores} \quad L = 9.8 \text{ Km}$$

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:

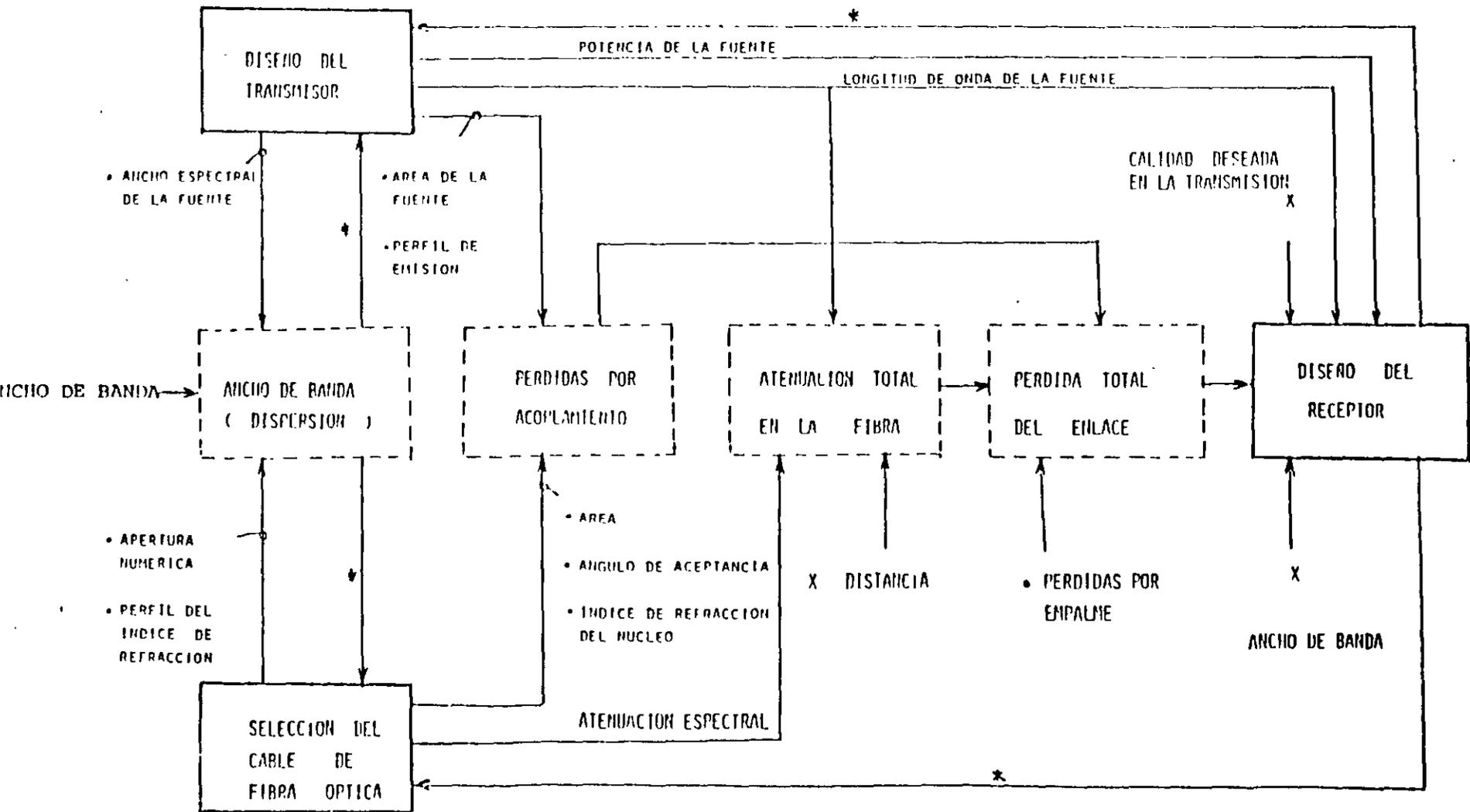
- Los parámetros de diseño de un sistema de comunicación por fibra se dividen, básicamente, en requisitos del usuario, cálculos principales y resultados de diseño.
- Los requisitos del usuario de interés son: la distancia, la velocidad de transmisión o ancho de banda, el tipo de datos: analógicos o digitales 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.

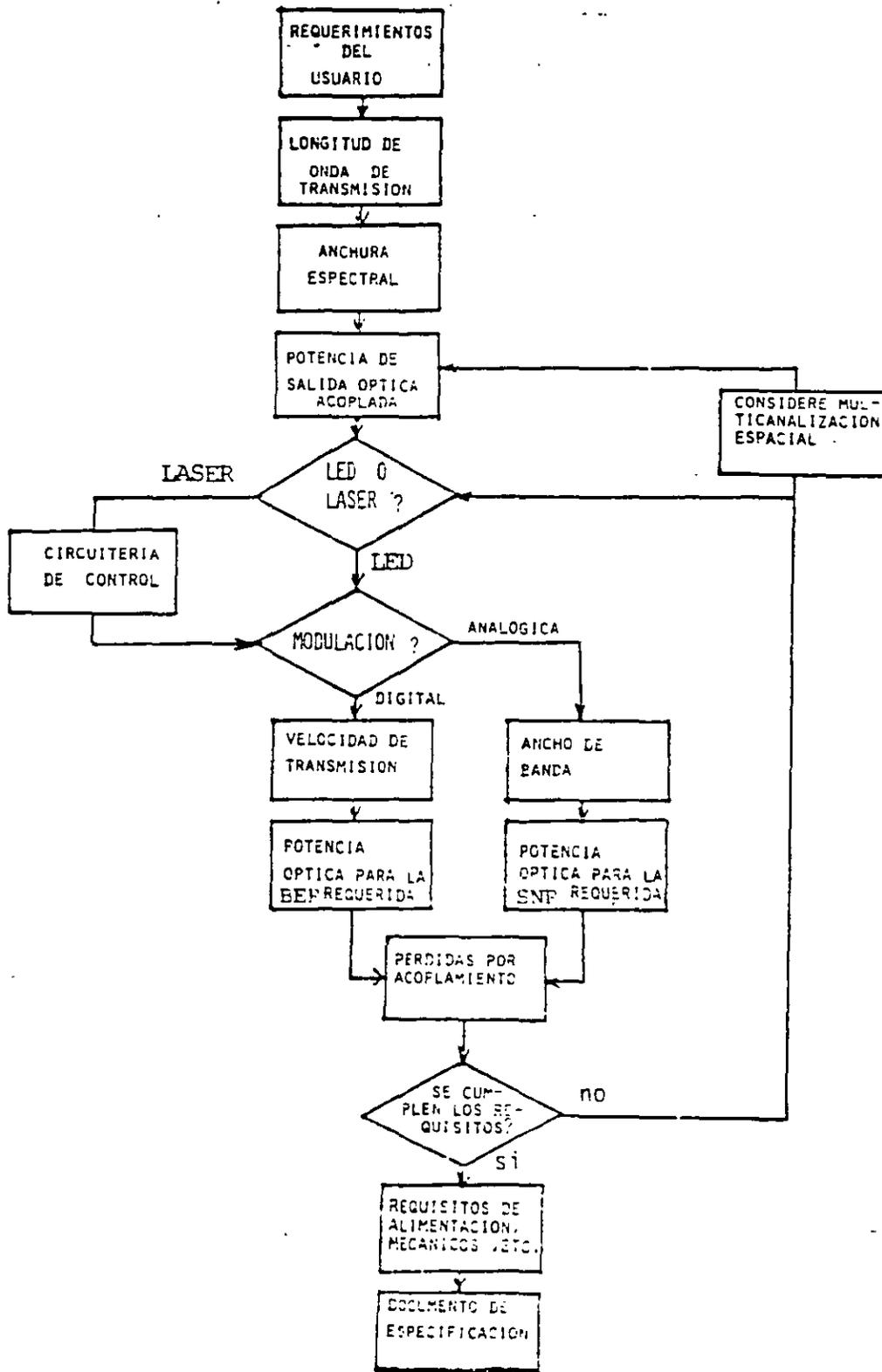


Figura (2).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del transmisor óptico.

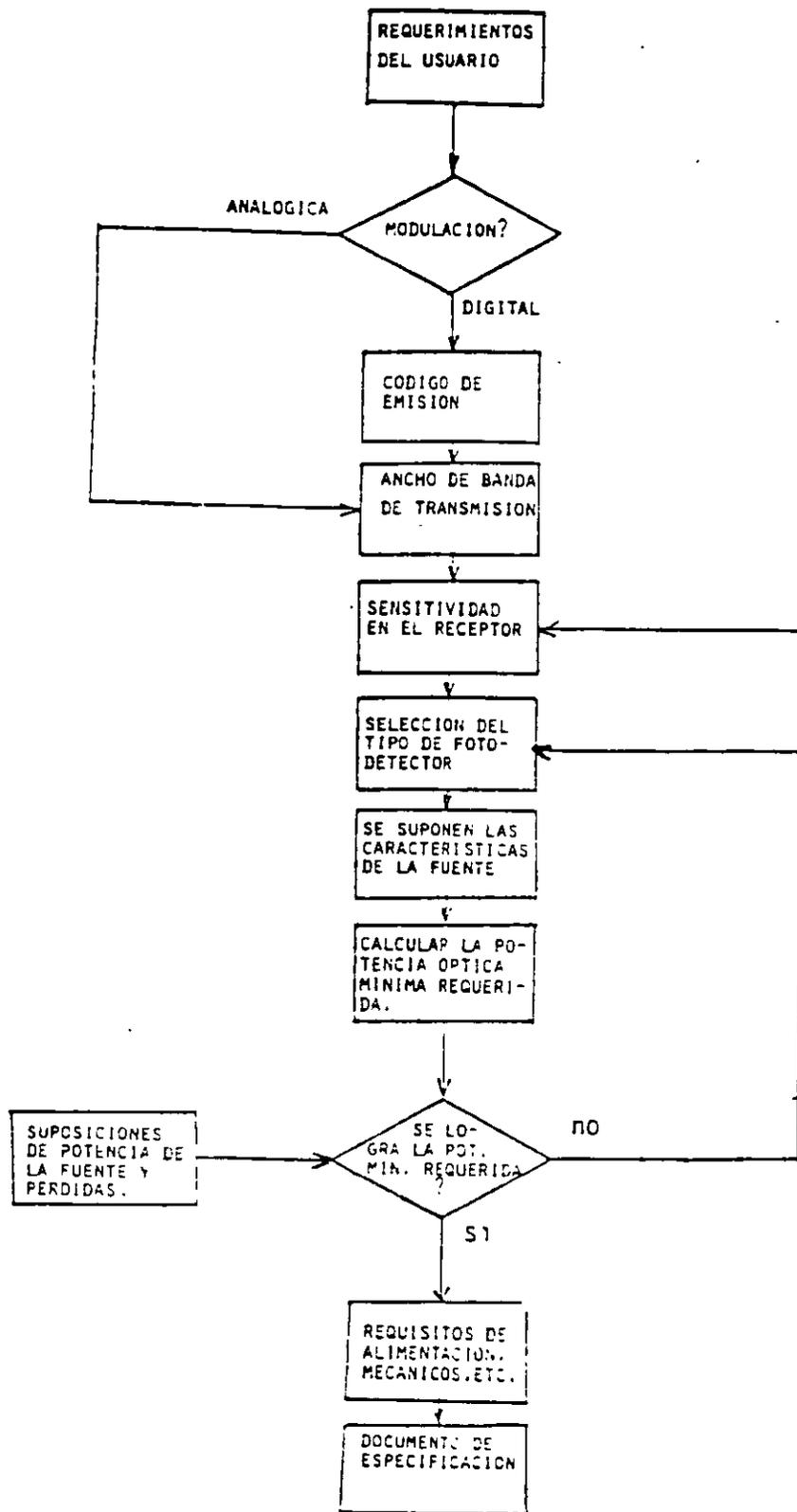


Figura (4).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del receptor óptico.

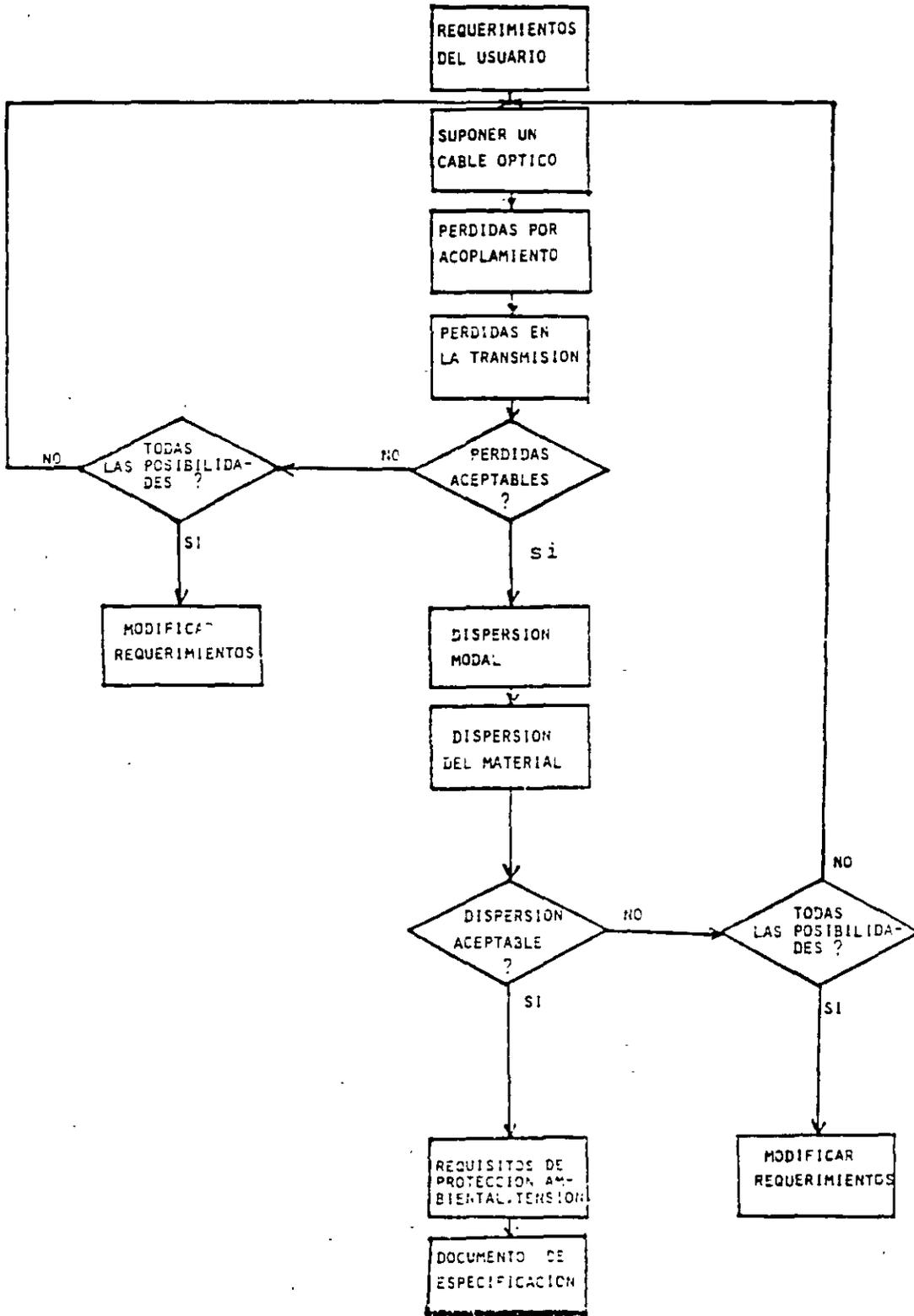


Figura (3).- Diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño para la selección del cable de fibra óptica.

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.

Debe mencionarse 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 reperidores 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 lleve 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 en 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 30 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 obra 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 metálicos, 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 Inversion) el cual se utiliza en el caso de enlaces limitados por dispersión, afin de no aumentar la velocidad de transmisión.

TIPOS 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.

Uno 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 nodo terminal y por lo tanto, presenta diferentes pérdidas tanto por la derivación, 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 complicaciones 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 concluido que con el objeto de minimizar las pérdidas de la fibra óptica se requerirá del uso de la tecnología de longitud de onda de $1.3\mu\text{m}$, 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 μ 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 sistemas 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 de 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.

BBB codificador, DSCR aleatorizador, FO localización de fallas, LA alarma laser, OS transmisor laser, REG regenerador, SCR desaleatorizador.

Finalmente la codificación HDS-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. Aunado 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 interpreta dos 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 co- dificaciones 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 pue- de 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 se ñales de codificación HDB-3. Este tipo de codificaciones presenta el pro- blema de un nivel de estabilización tanto para el transmisor como para el receptor.

En lugar de esta codificación de interfaz han presentado diferentes opcio- nes 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 (Com- plemented 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 nega tivo 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 cade- nas 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.

En 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 μm de diámetro para el núcleo y de 100-200 μm 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 μm 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 en 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 demultiplexador, 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 multiplexado es mucho menor en diámetro que un cable de cobre multiplexado 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 optoelectrónicos.

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 com
pite 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-dis-
tancia, favorece en costo a la fibra óptica con respecto al cable coaxial
y al cable de cobre multipar, indudablemente su ventaja en cuanto a flexi-
bilidad, resistencia a altas temperaturas y a la corrosión permiten su --
aplicación en la comunicación de centrales telefónicas interurbanas, con-
tenidas por lo general en este rango de distancia.

Para larga distancia (mayor a 30Km), el incremento del uso de reptidores
hace que la tecnología actualmente desarrollada (fibras ópticas multimoda
les a una longitud de onda de 0.85um) no sea lo suficientemente competi-
va con los enlaces de microondas actualmente empleados. Quizá el desarro-
llo de la tecnología de longitud de onda de 1.3um, con su consecuente dis-
minución de repetidores, permita que los sistemas de comunicación por fi-
bras ópticas resulten más atractivos económicamente a largas distancias.

De lo anterior se puede concluir que en la actualidad los sistemas de co-
municación por fibras ópticas tienen una mejor competitividad con otros me-
dios 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/i .
 Total 0.8 dBs/Km.

$$\text{Dist.} = \frac{\text{perdidas en inst.}}{\text{perdidas variables}} = 57 \text{ Km.}$$

TABLA 1

NIVEL DE GERARQUIA	ESTADOS UNIDOS				EUROPA						
	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
DATI	3	3	1	3	1	3

TABLA 5

EQUIPO TRANSMISOR RECEPTOR DE SEÑALES
DE VIDEO POR FIBRA OPTICA

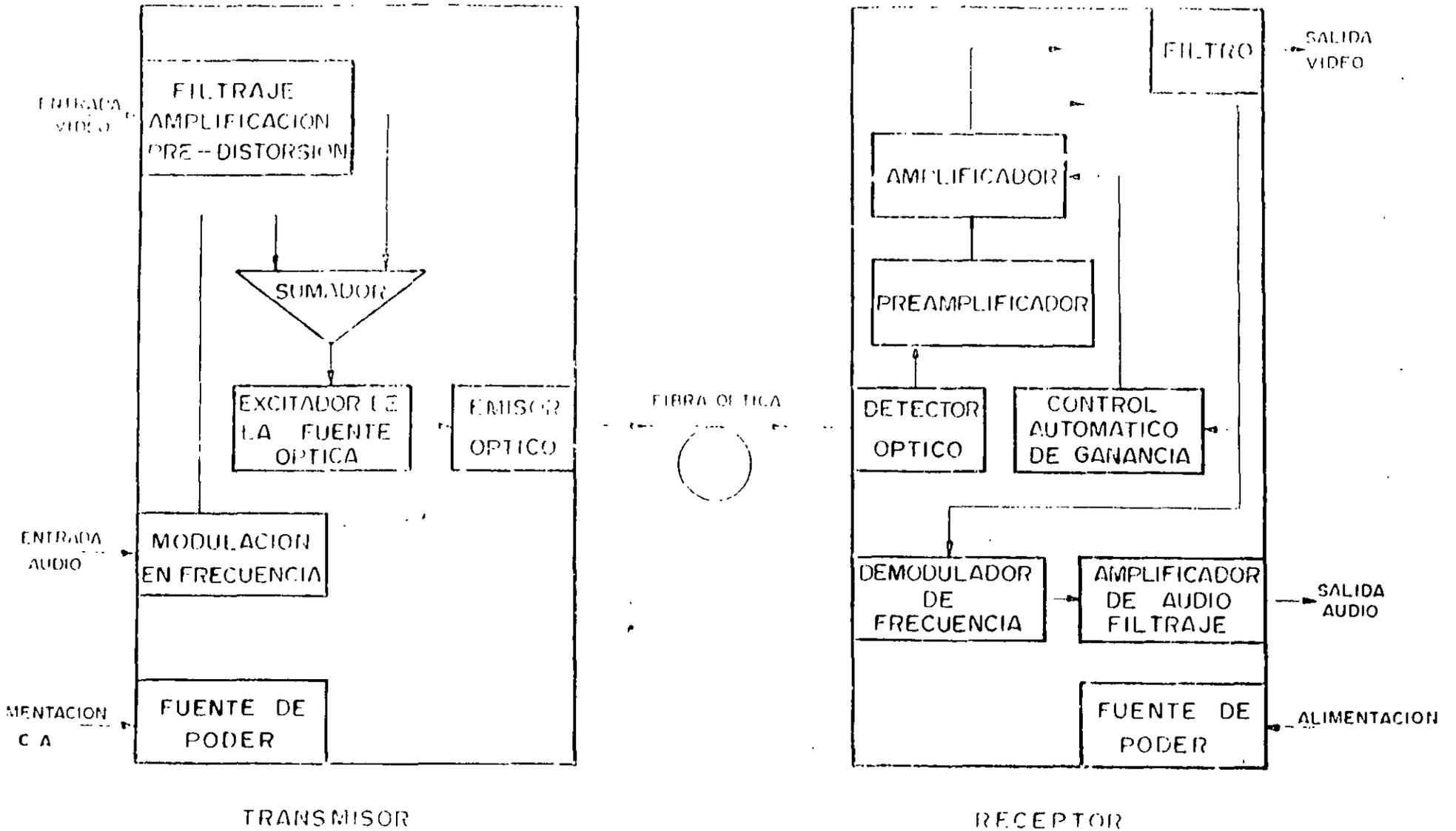


FIGURA 1. Sistema de transmisión analógica para señales de video.

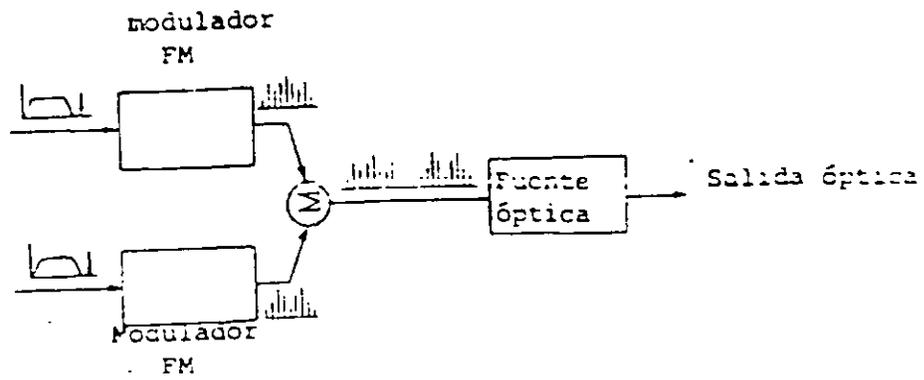


FIGURA 2. Multicanalización analógica por división en frecuencia.

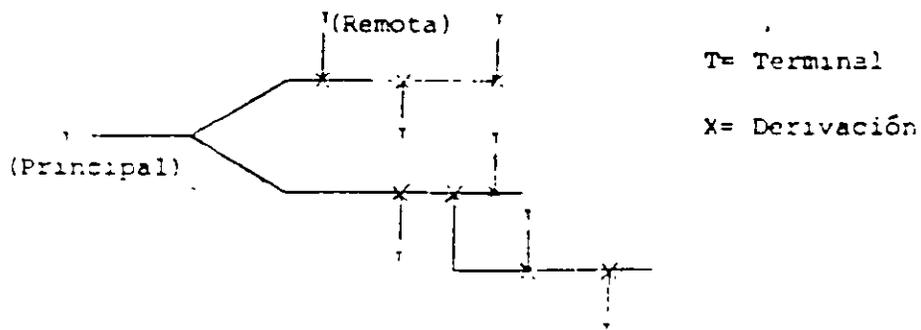


FIGURA 3. Red de distribución con topología de tipo árbol.

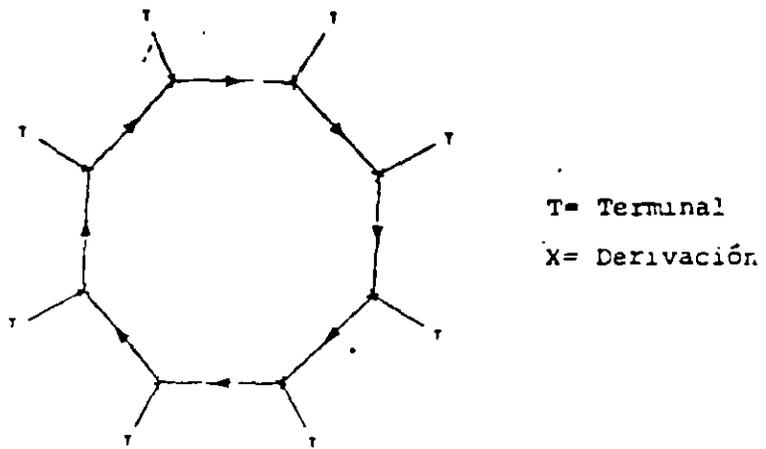


FIGURA 4. Red local tipo anillo

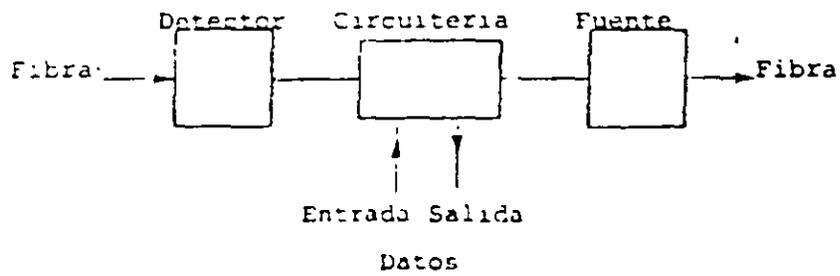


FIGURA 5. Sistema de derivación activo para red local por fibra óptica.

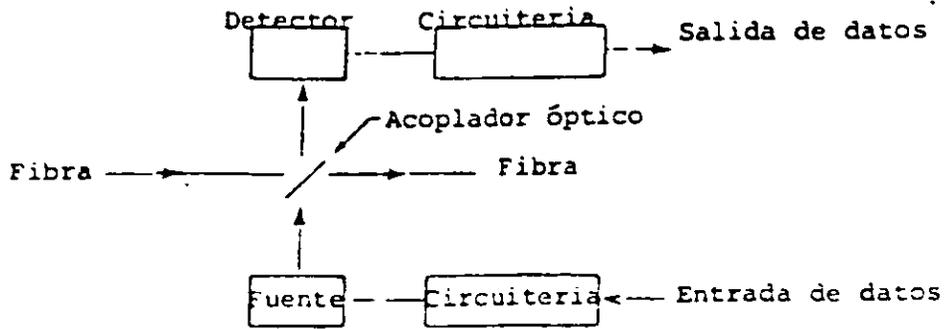


FIGURA 6. Sistema de derivación pasivo para recibir información por fibra óptica.

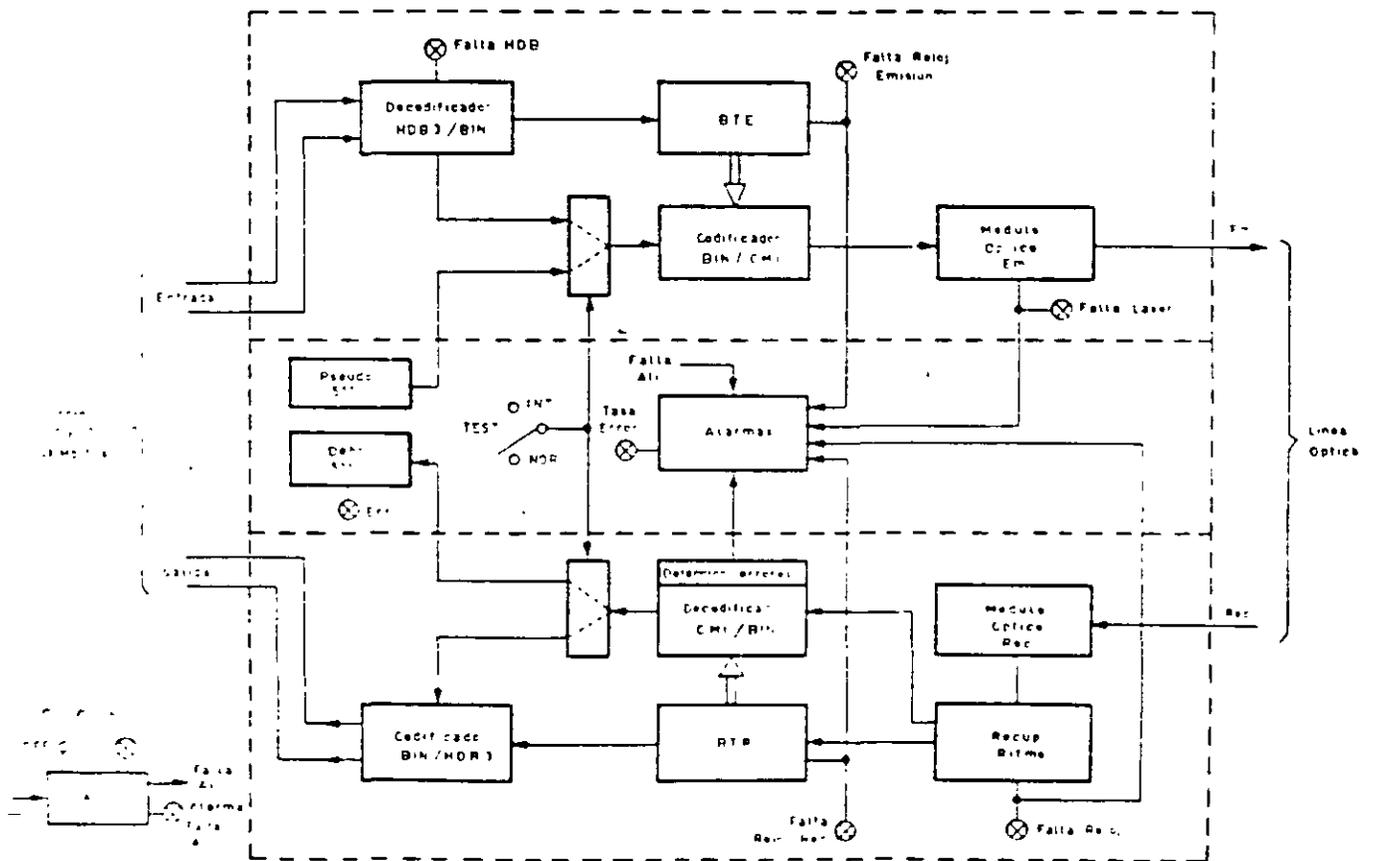


FIGURA 7. Equipo terminal de línea óptica para transmisión P.C.M.

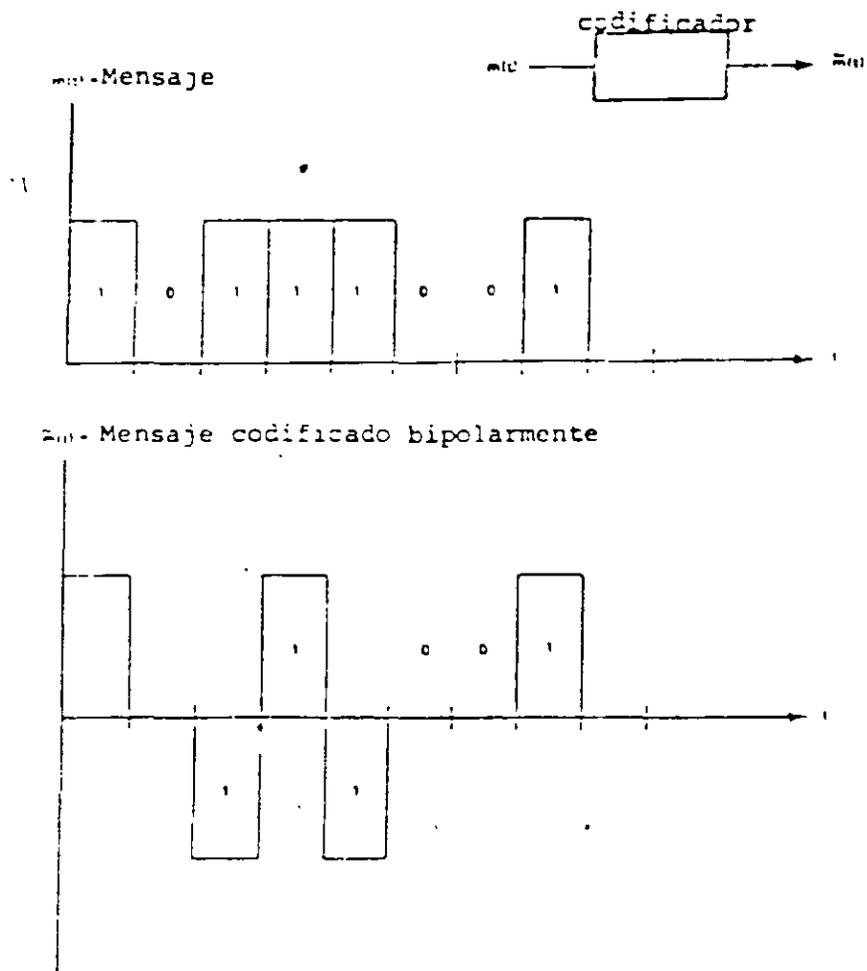


FIGURA 8. Codificación de línea bipolar

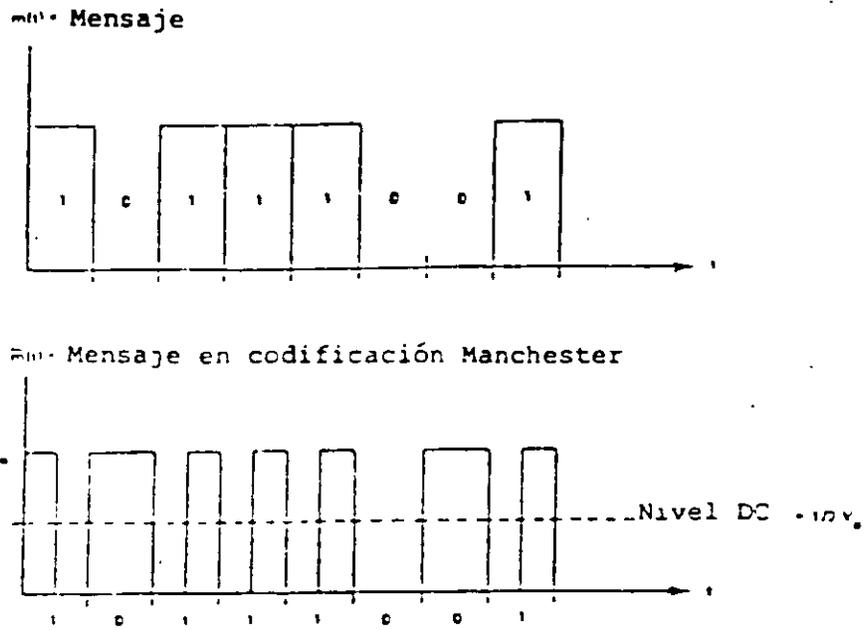


FIGURA 9. Código Manchester.

AMI/RDS-3	Potencia óptica
-1	0
0	P_t
+1	$2P_t$

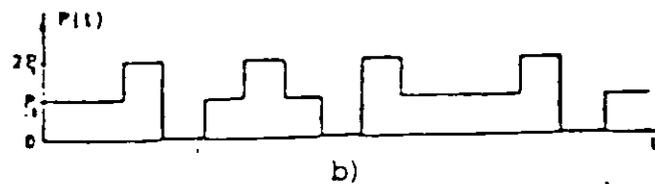


FIGURA 11. Transmisión de un código bipolar usando tres niveles de potencia óptica.

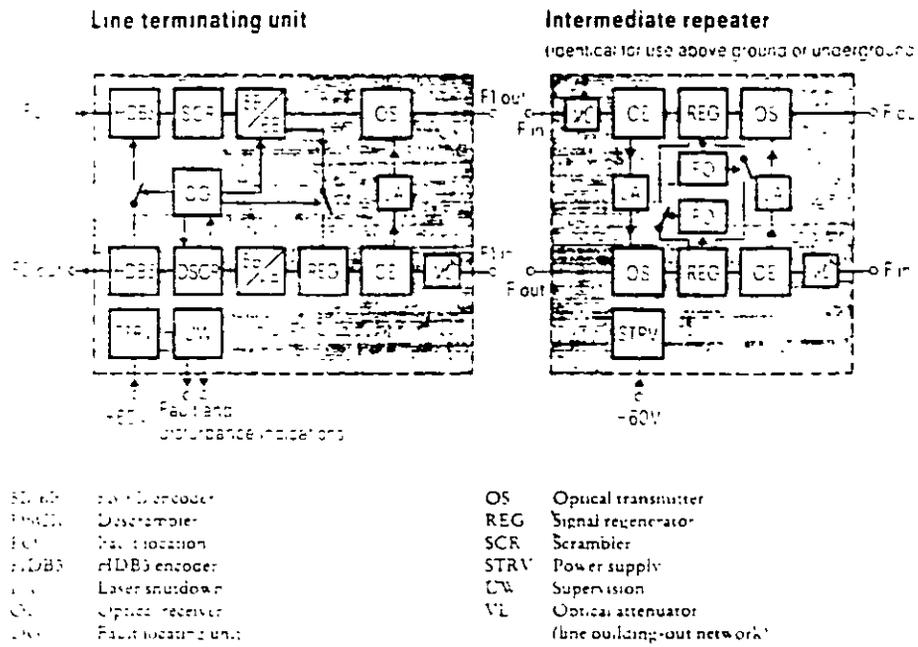


FIGURA 10. Equipo terminal de línea para comunicaciones digitales por fibra óptica.

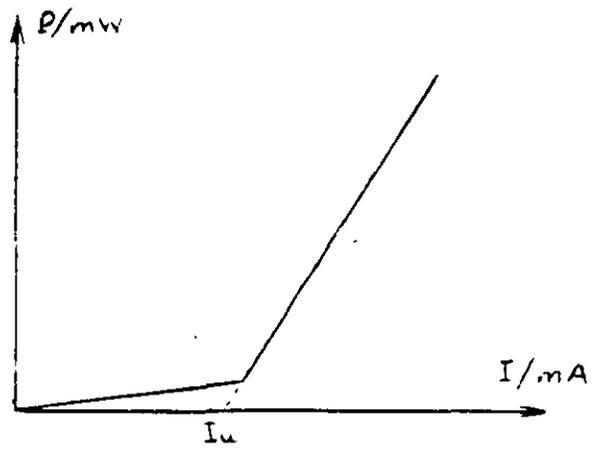


FIGURA 12 Respuesta de un diodo láser.

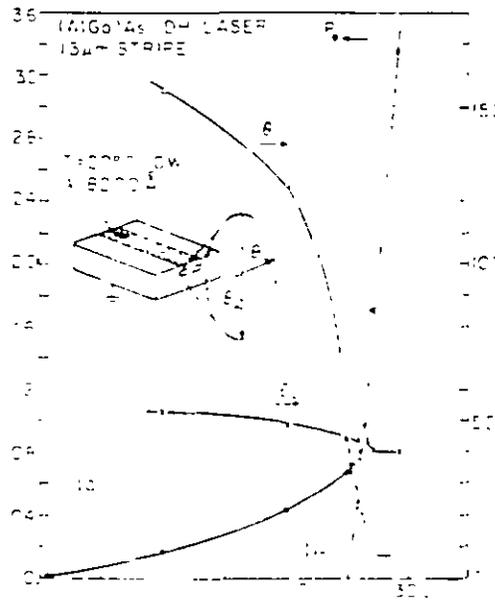


FIGURA 10 Angostamiento espacial del haz láser con la corriente de inyección.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

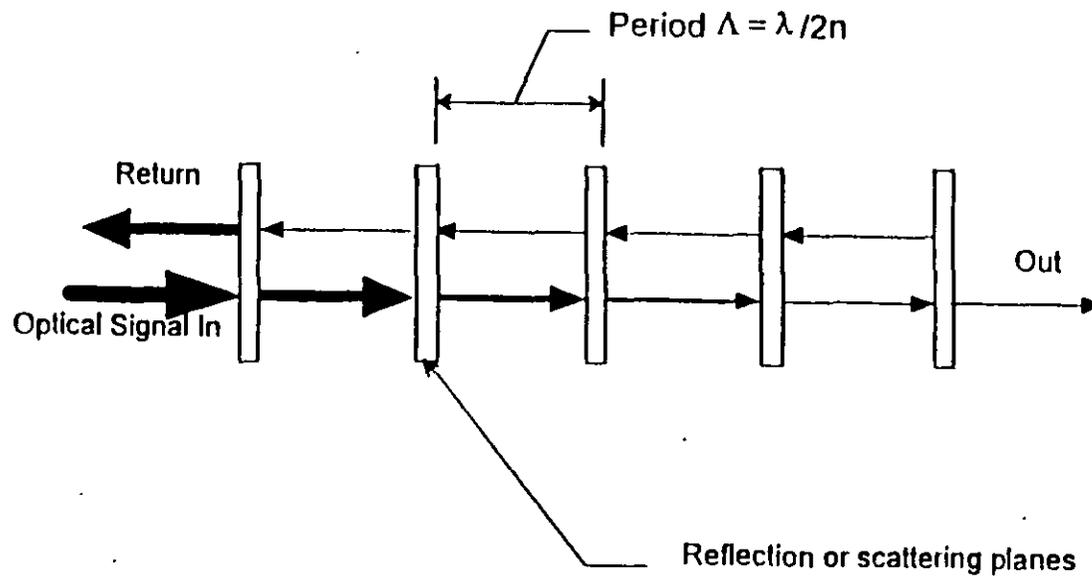
**REJILLAS DE BRAGG EN FIBRAS ÓPTICAS COMO ELEMENTOS
DE LÍNEA WDM**

**EXPOSITOR: DR. SERGUEI KOTIANTSEV
PALACIO DE MINERIA
JUNIO DEL 2002**

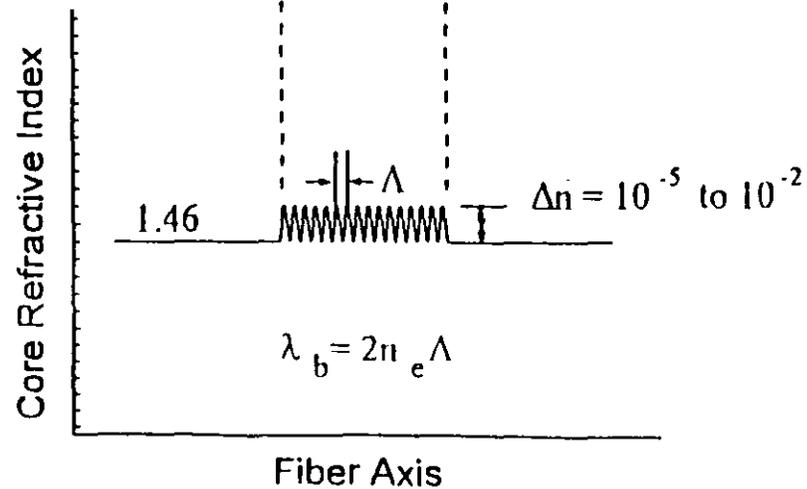
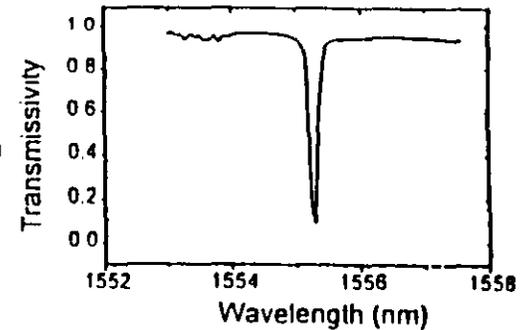
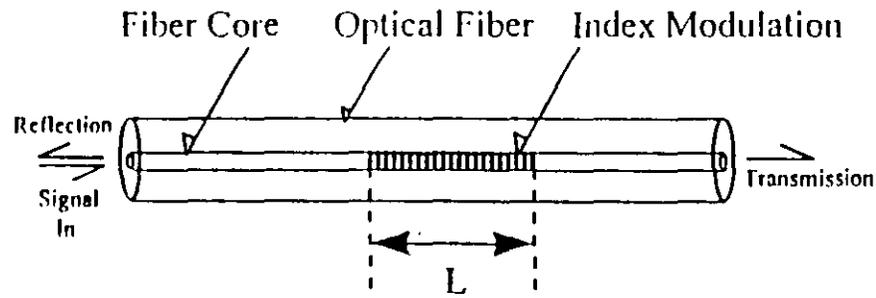
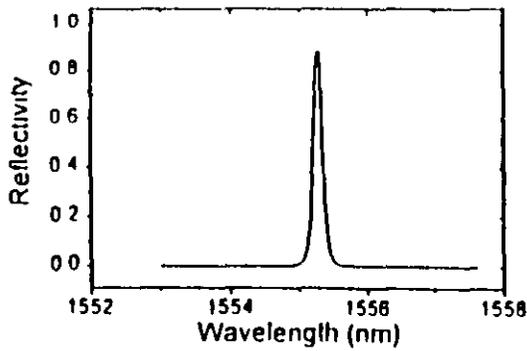
CONTENIDO

- **Introducción.**
- **Principios de Rejillas de Bragg**
- **Métodos de fabricación**
- **Fenómeno de modificación de índice de refracción de vítreo de cuarzo**
- **Características de exposición**
- **Acoplamiento de modos**
- **Dispositivos en base de Rejillas de Bragg en fibras ópticas**
- **Aplicaciones en telecomunicaciones**
- **Aplicaciones en sensores ópticos**
- **Conclusiones**

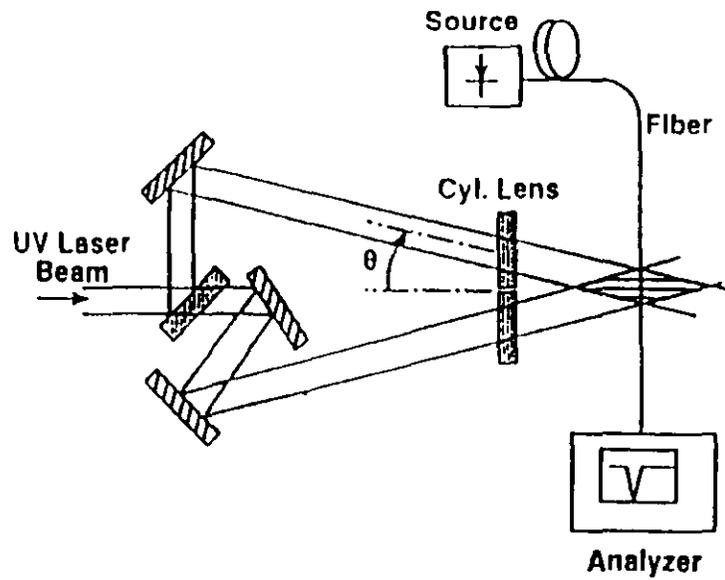
Fiber Bragg Grating



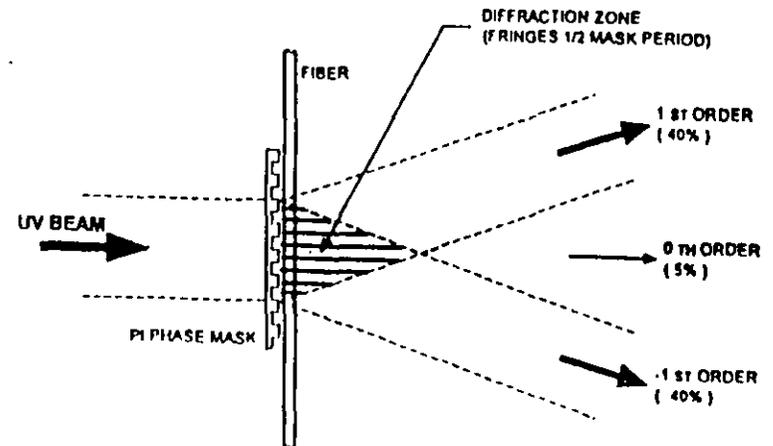
Fiber Bragg Grating



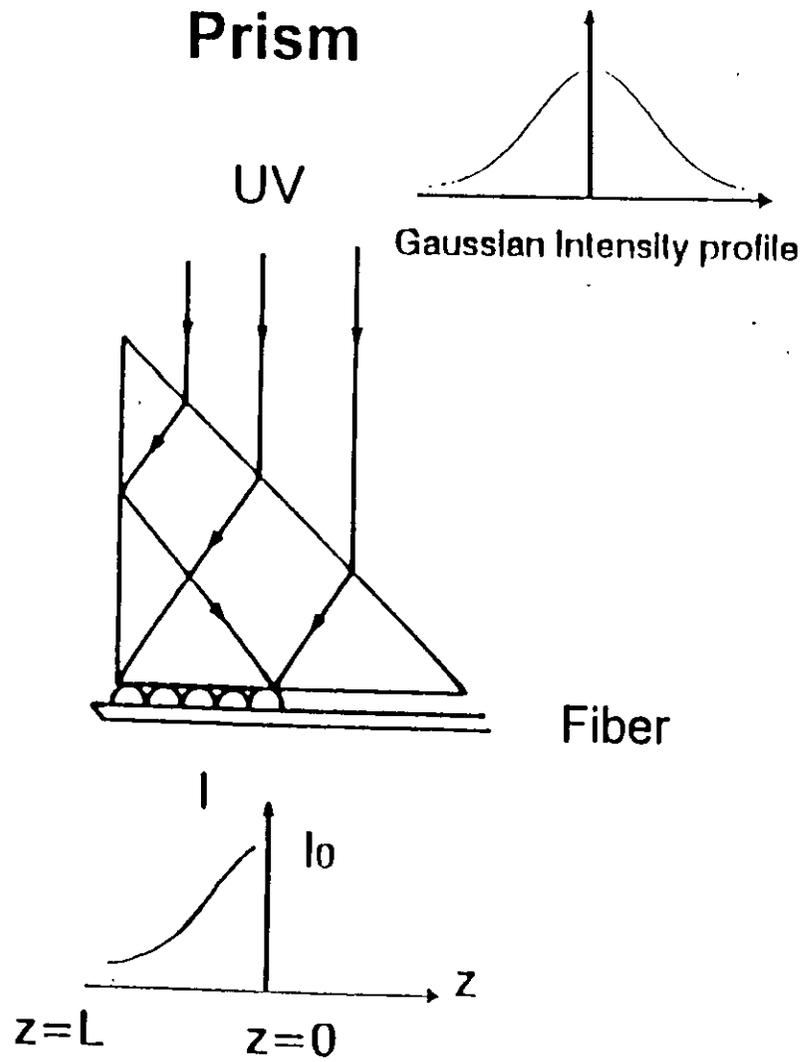
Holographic



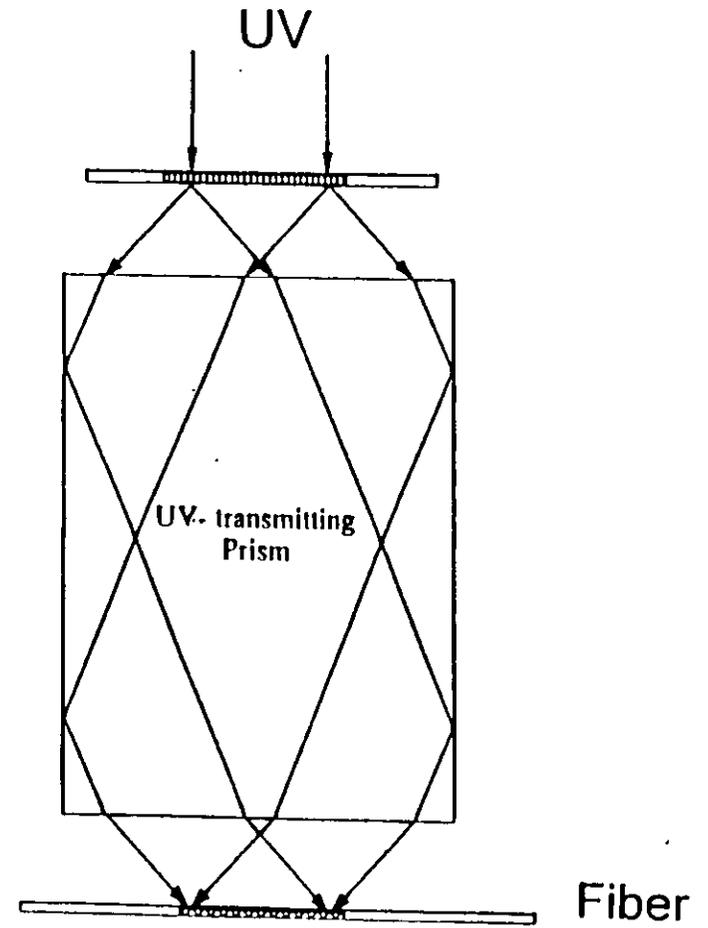
Mask



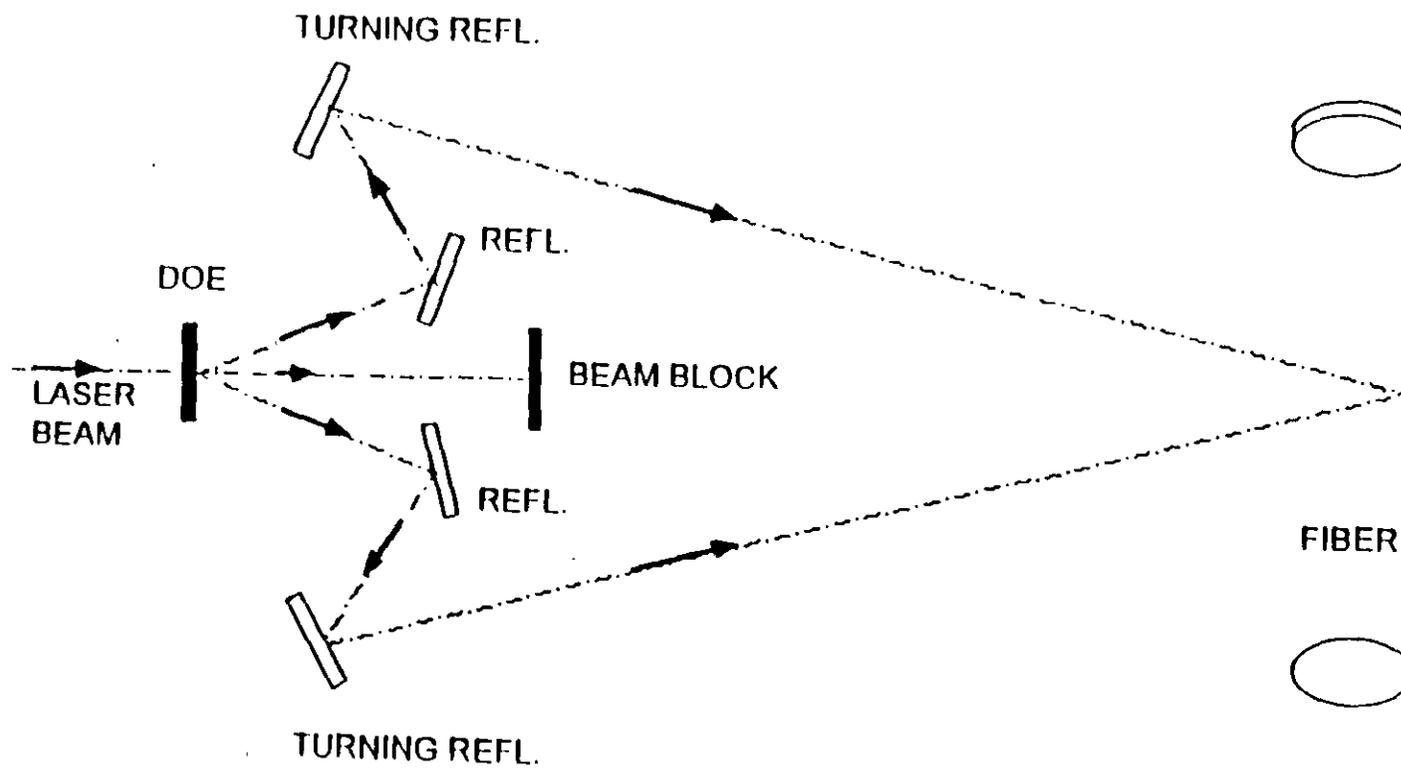
Prism



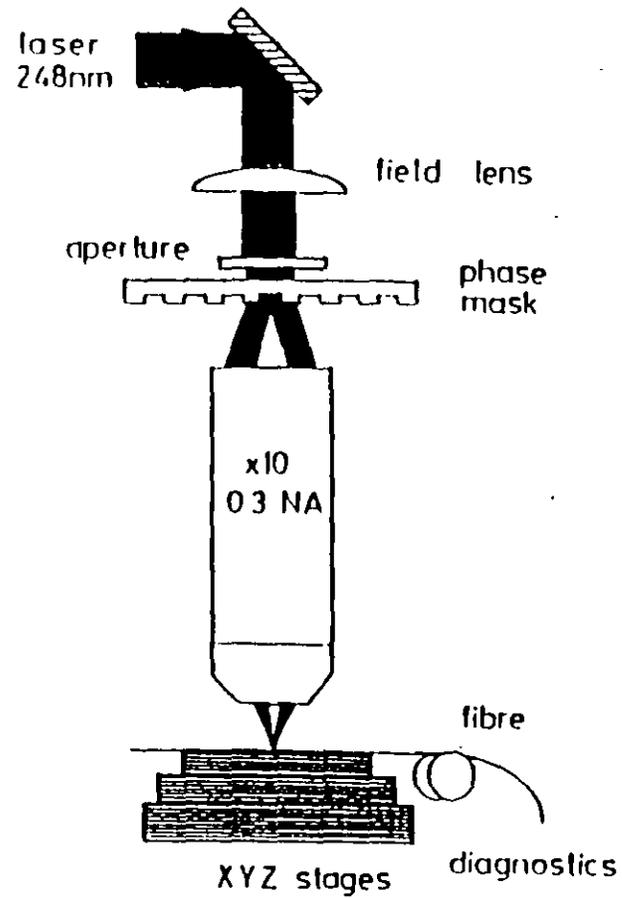
Remote Mask



Using Mask as Beam Splitter

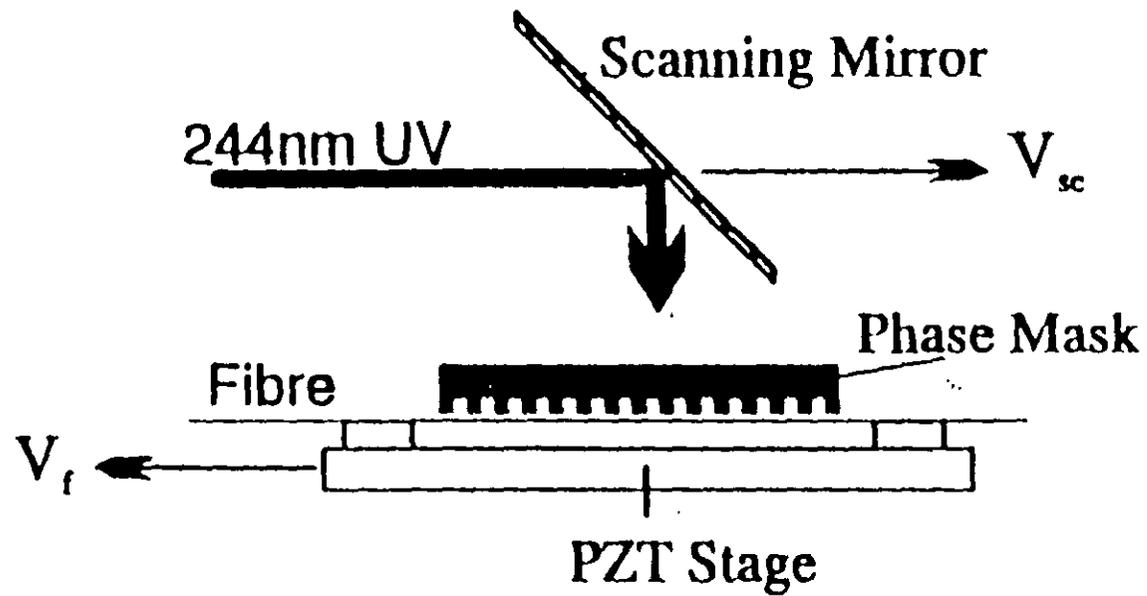


Phase-shifting Mask Projection



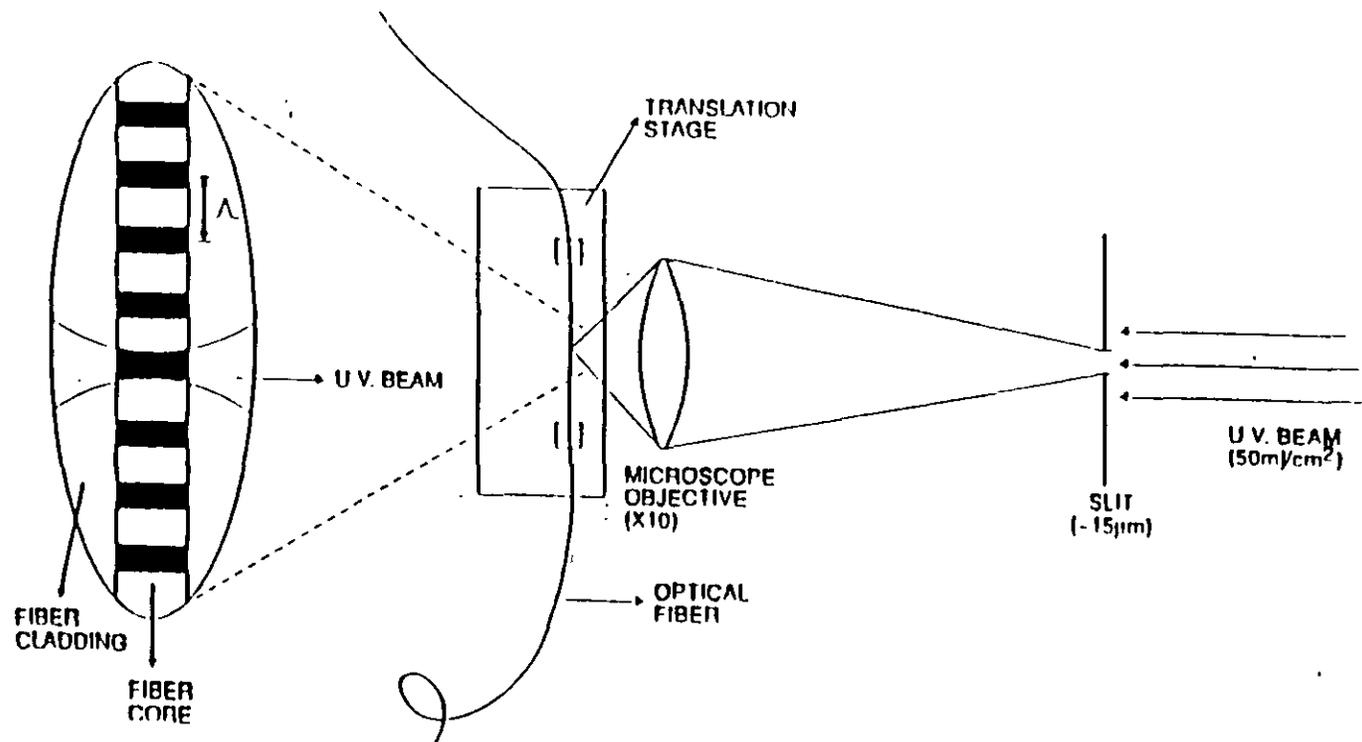
N.H. Rizvi et al., *Elect. Lett.* Vol 31.
No. 11, 1995

Mask with Scanning System



M.J. Cole et al.

Point-by-Point Exposure



1. High order grating reflector.
2. Polarization mode coupler (rocking filter).
3. Fiber mode converter in forward direction.

B. Malo, Quebec
Photosen. Conf. 1993

Large Scale Manufacturing

- ◆ **On-Line Exposure During Fiber Draw**

 - Single shot exposures with excimer laser.

 - High strength fiber arrays for sensor applications.

- ◆ **In-Line Process**

 - Run Spool of fiber through system; arbitrary exp. time.

 - Strip, expose, anneal & recoat gratings serially

- ◆ **Batch Process**

 - Strip, expose, anneal & recoat gratings simultaneously

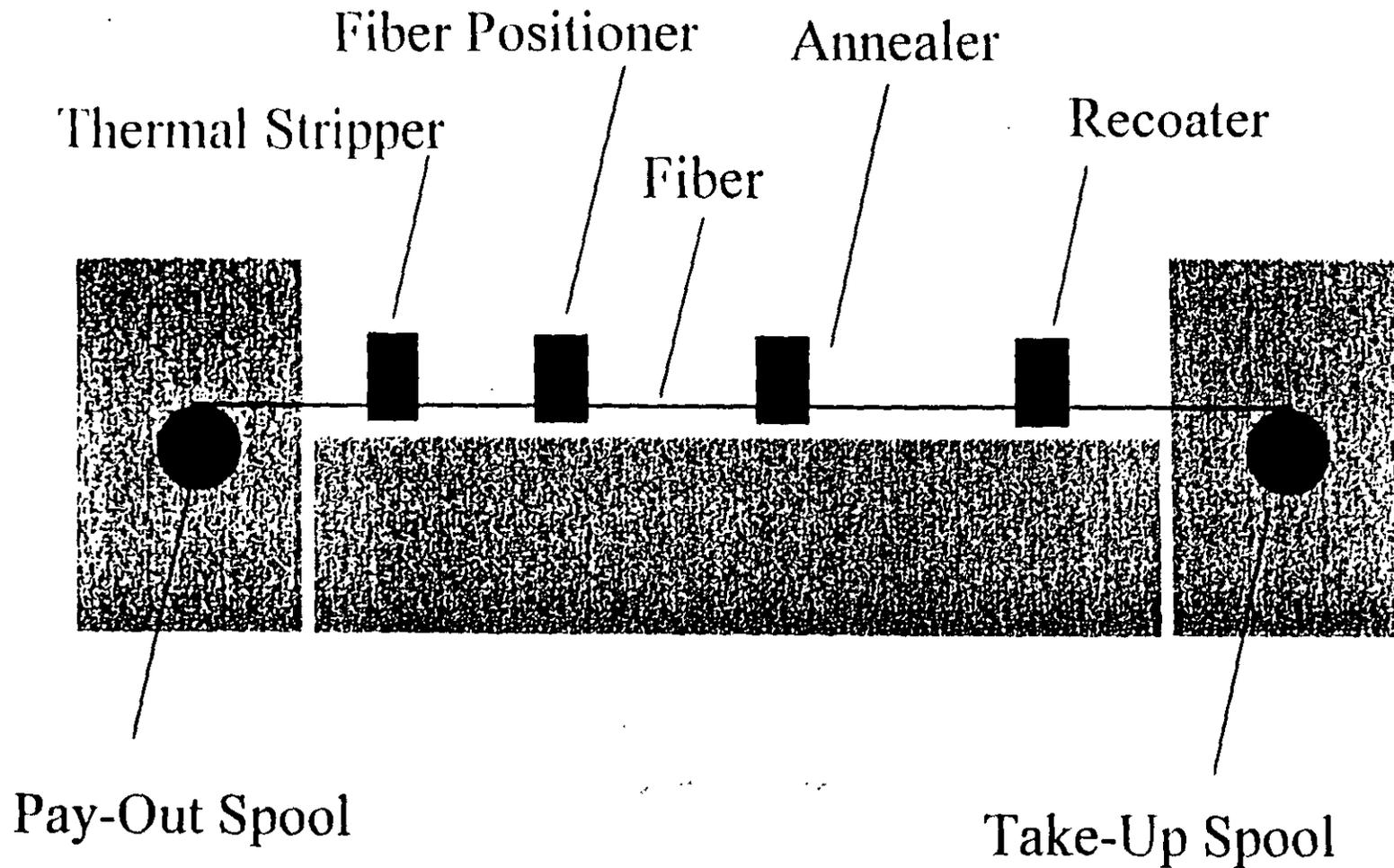
 - Use large exposing beam or scanning system.

- ◆ **QC & Final Test**

 - Automated testing

 - Develop high yield process

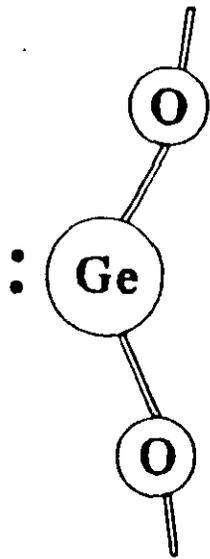
In-Line FBG Manufacturing



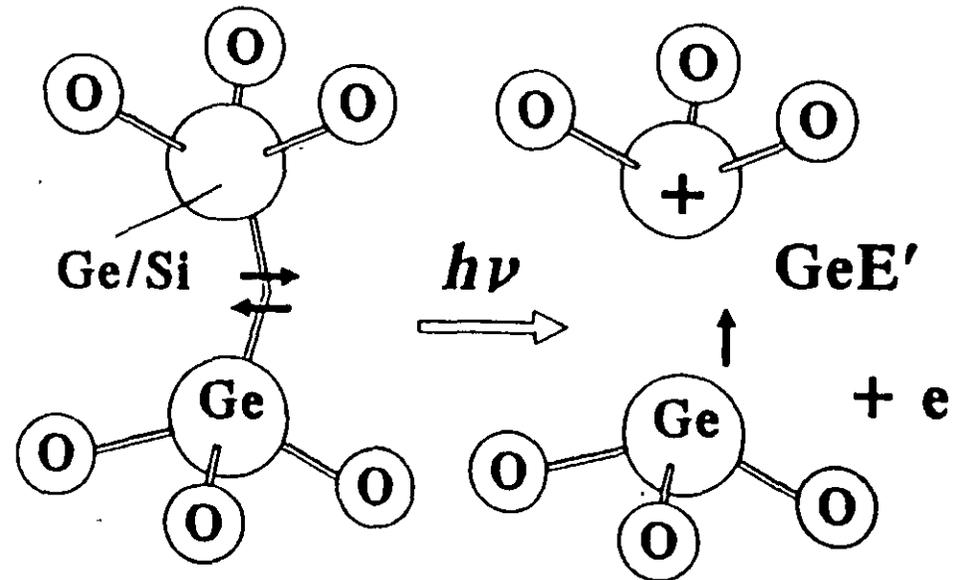
JV Irradiation Effects on Germania Doped Silica

1. Partial Bleaching of 242 nm absorption band.
2. Increase in 195 nm absorption band.
3. Increase in absorption in visible band.
4. Decaying photoluminescence at 410 nm and 290 nm.
5. Increasing photoluminescence at 650 nm.
6. Transient photodarkening in visible and near IR.
7. Formation of GeE' centers & elect./hole traps from ESR.
8. Transient gain and lasing at 1.0 μm .
9. Stress and density induced changes in fiber core.
10. Permanent increase (or decrease) in the index of refraction.

Germanium Oxygen Defect Centers

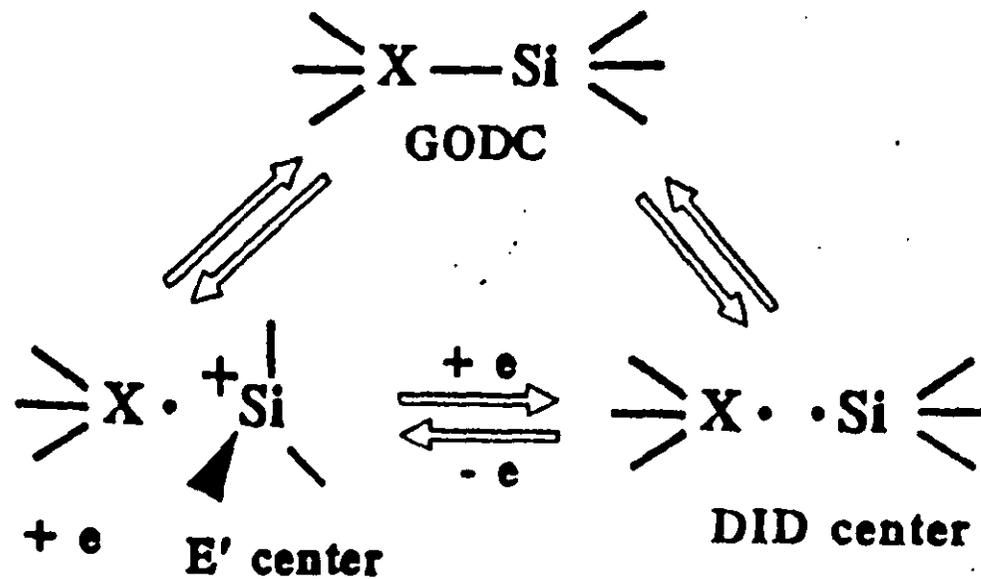


Germanium lone pair center
(GLPC)



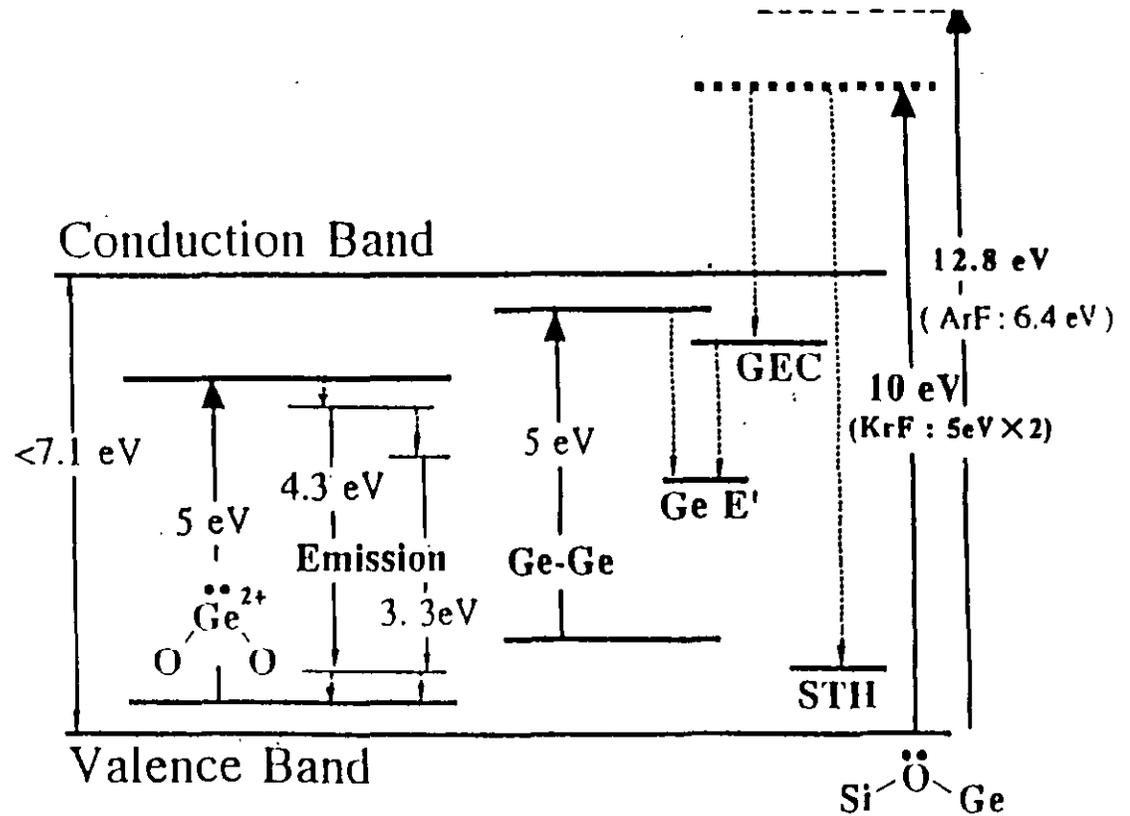
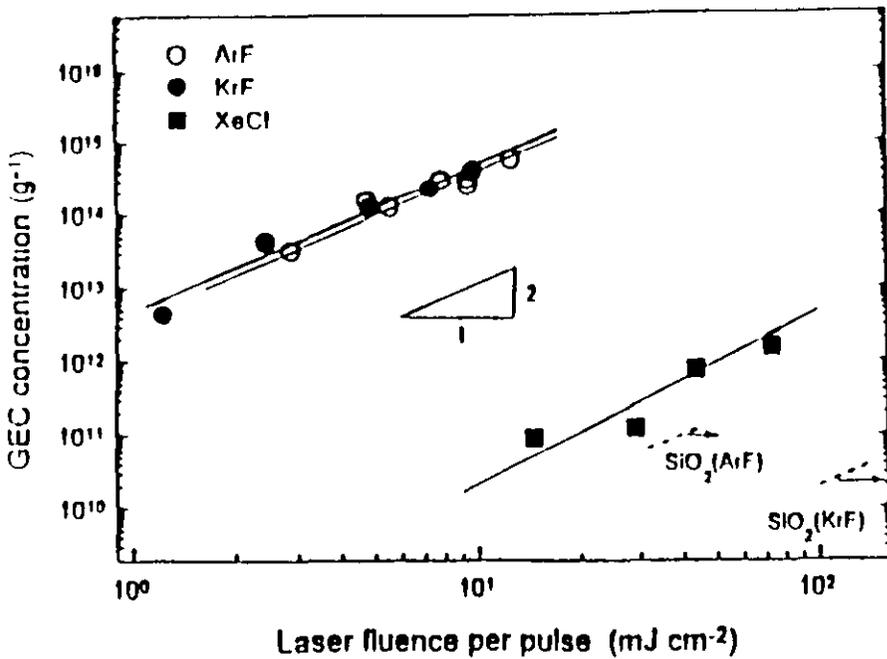
Neutral oxygen vacancy
(NOV)

Photodestruction schemes for the GODC



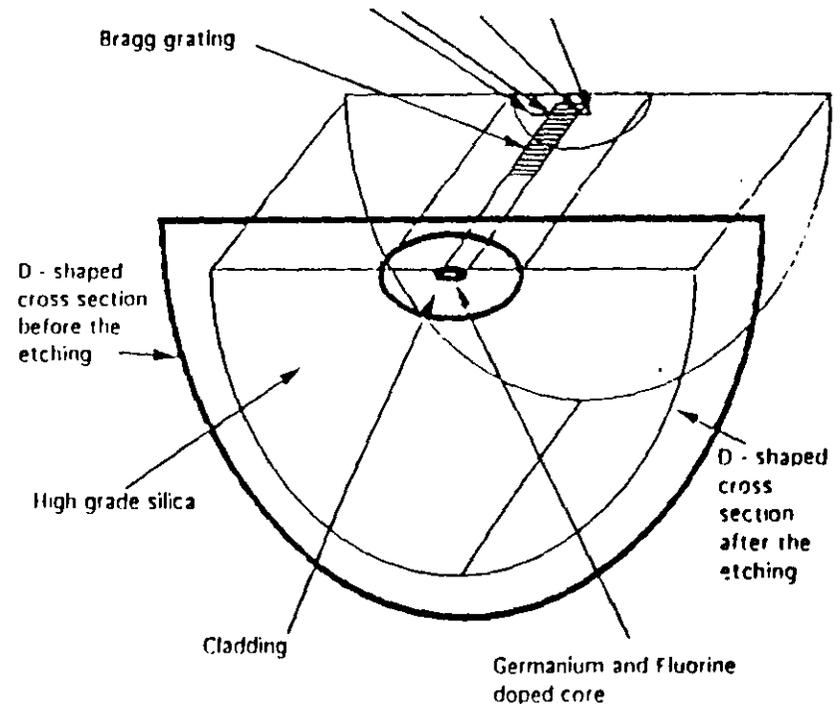
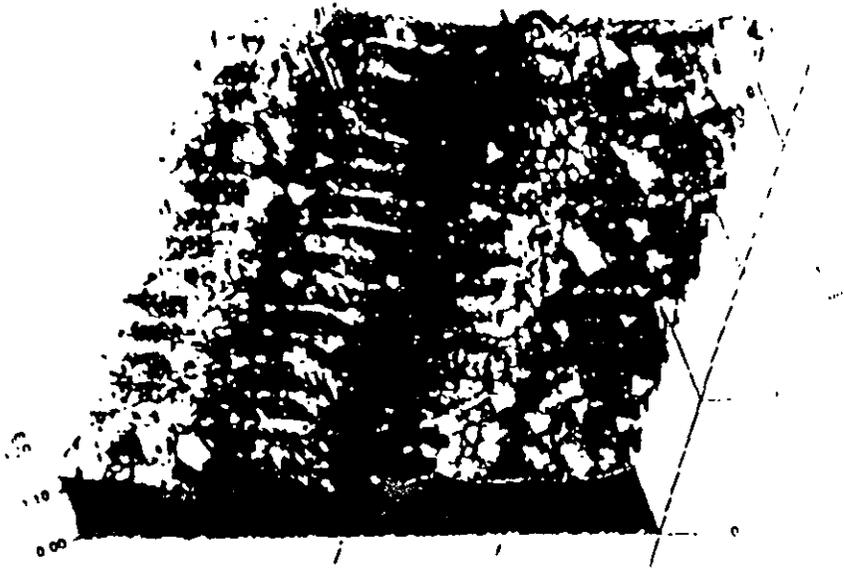
Proposed Energy Diagram

Hosono et al. Photosensitivity Conference 1995

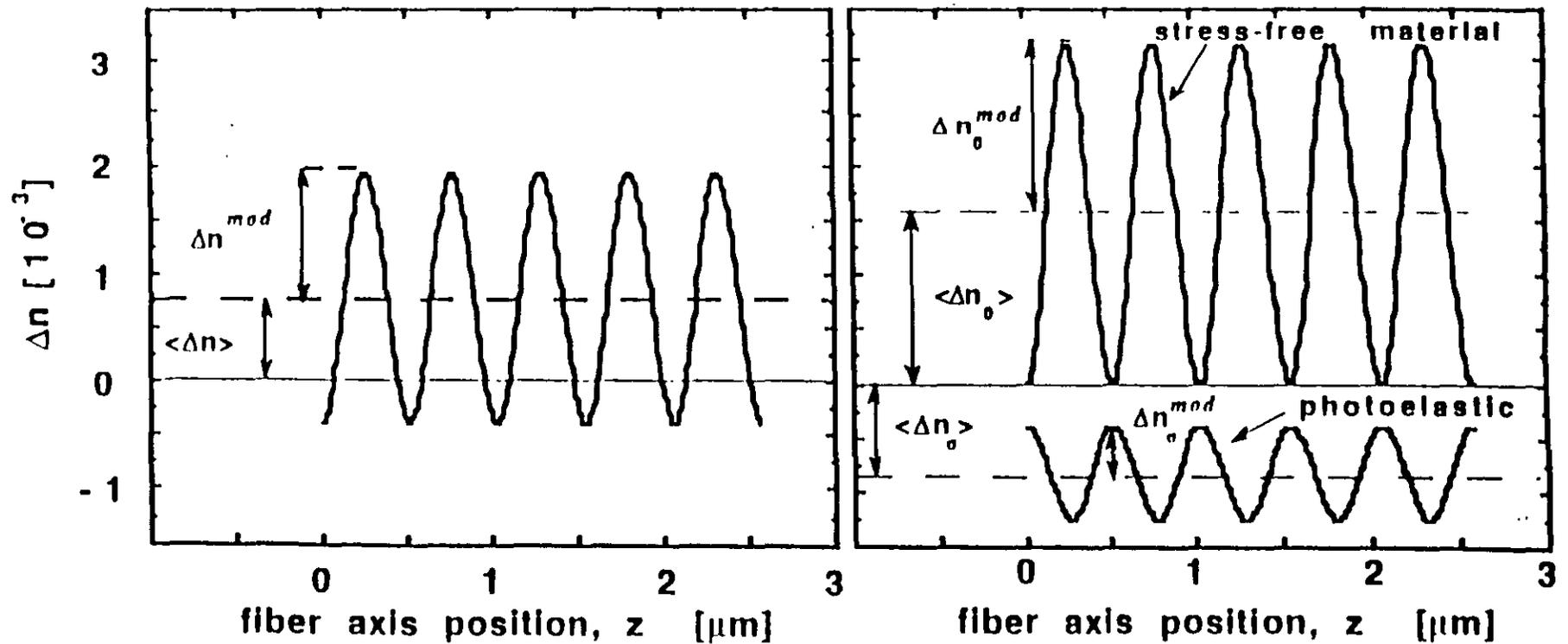


Modification to Silica Matrix from UV Exposure

AFM image of
etched fiber

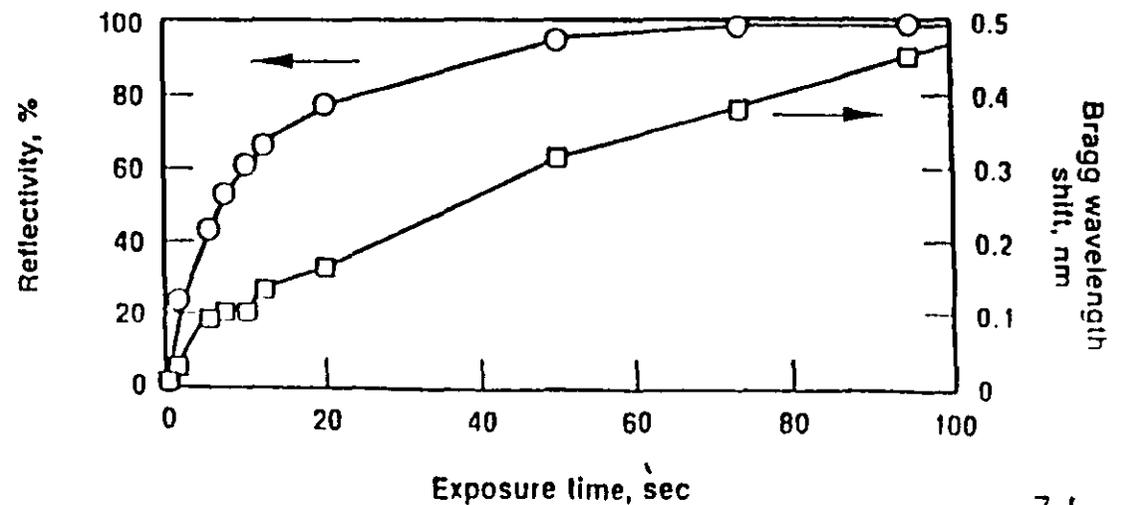
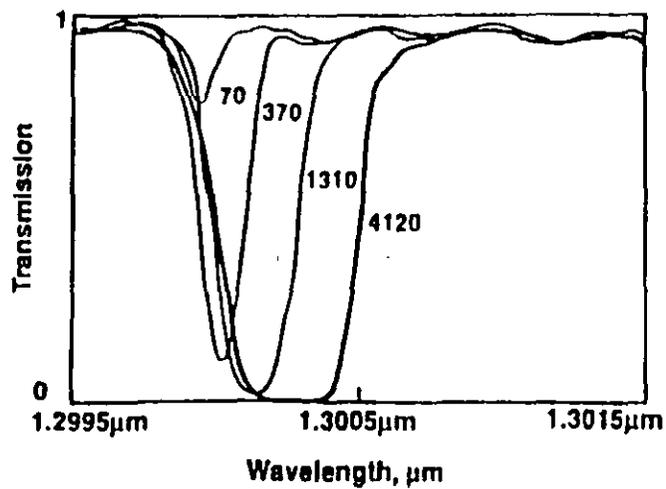
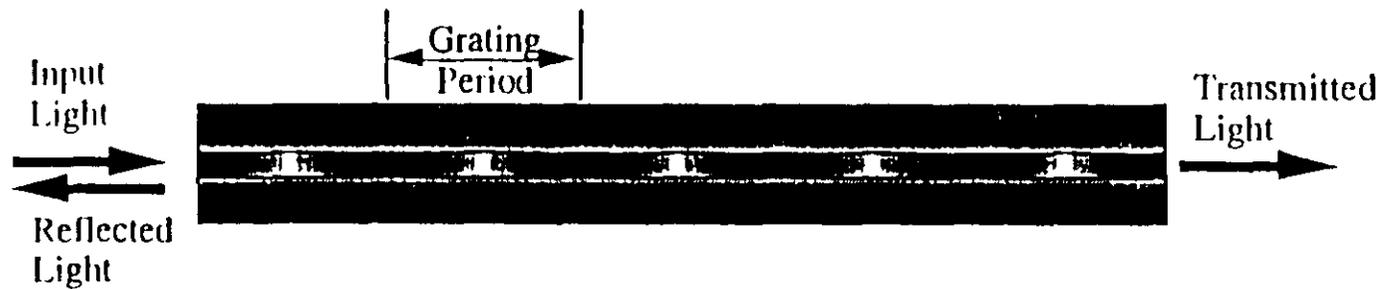


Photoelastic Effect



Limberger et al.
Photosen. Conf. 199!

Bragg Grating Exposure



Bragg Grating Formulae

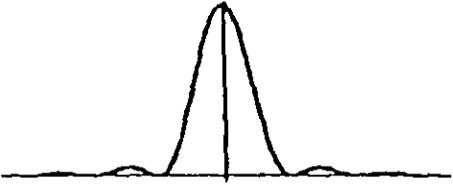
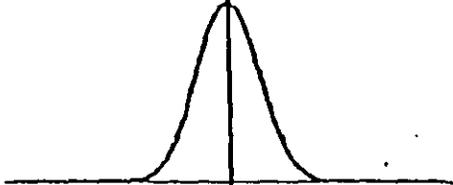
**Bragg condition or
wavelength of peak reflectivity: $\lambda = 2n_e\Lambda$**

Peak reflectivity: $R = \tanh^2(\kappa L)$

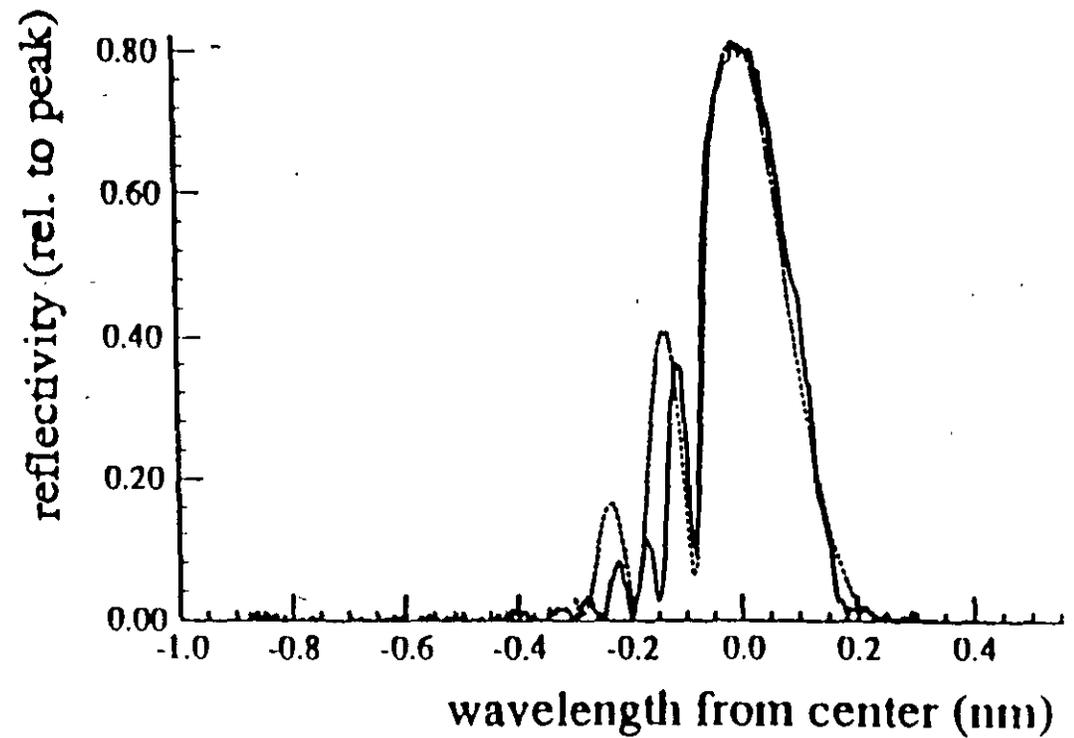
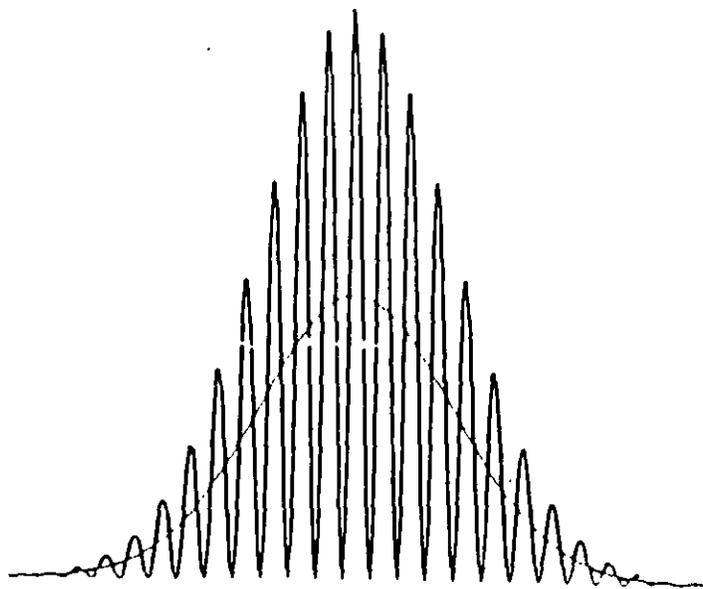
**Bandwidth: $\Delta\lambda = (\lambda^2/n)[(1/L)^2 + (\kappa/\pi)^2]^{1/2}$
 $\sim 1/L$ for $\kappa L \ll 1$
 $\sim \Delta n$ for $\kappa L \gg 1$**

Coupling constant: $\kappa = \pi\Delta n\eta/\lambda$

Apodization

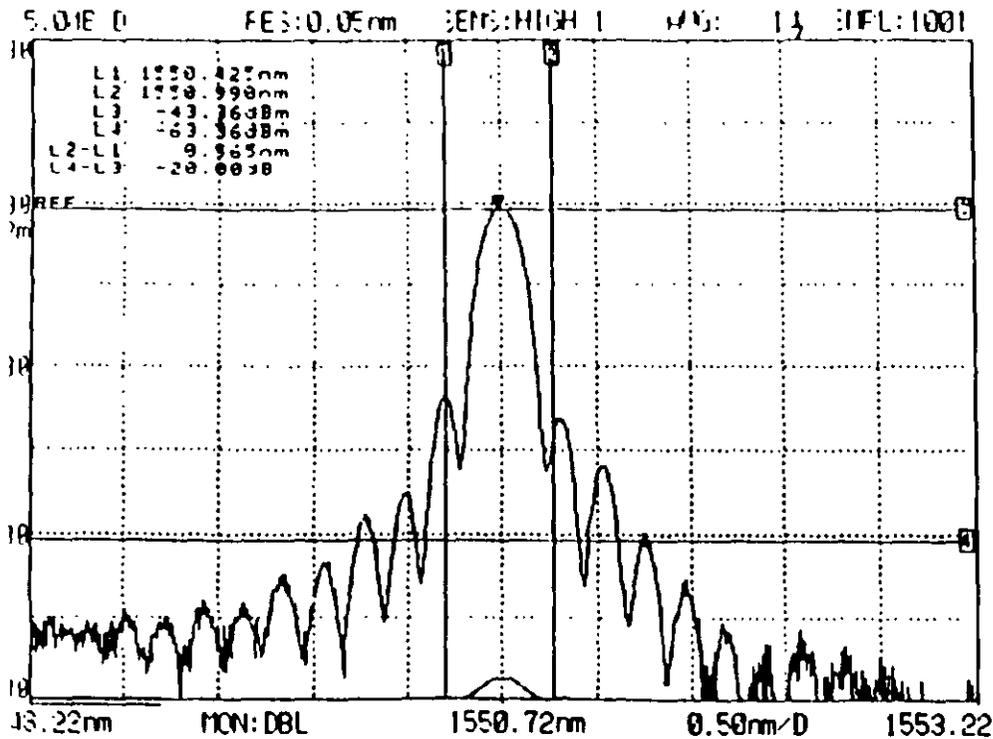
Type	Index modulation	Refl. spectrum
a) uniform		
b) tapered		
c) chirped		
d) Moiré		

Gaussian Apodization

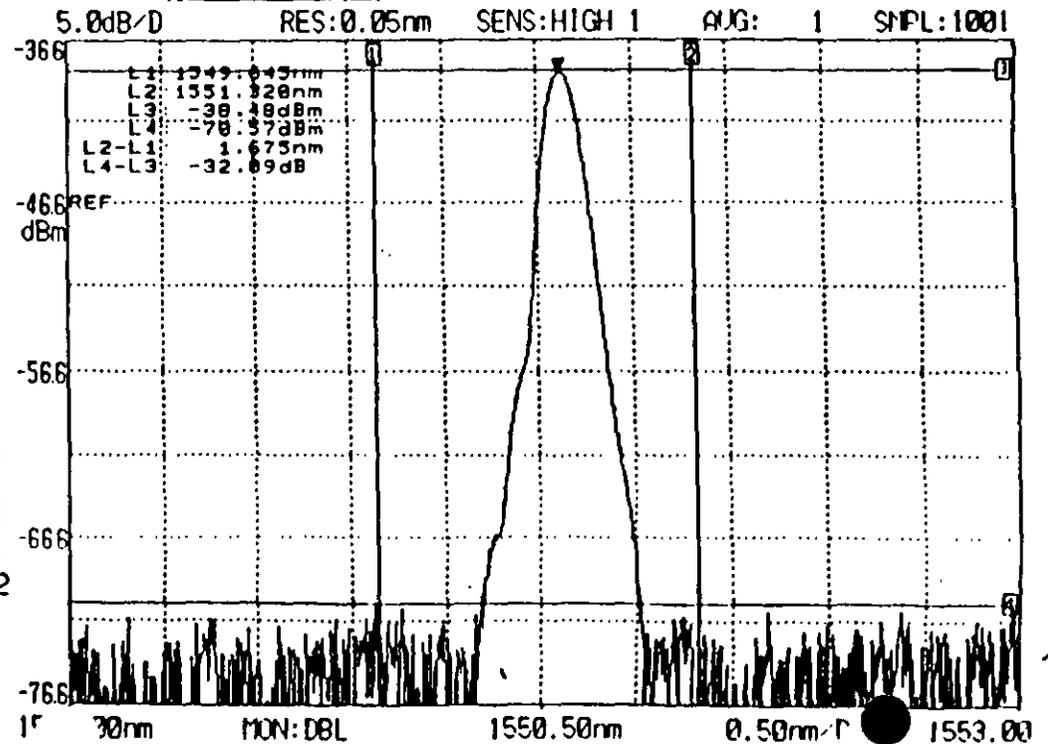


Side Lobe Reduction

Without Apodization

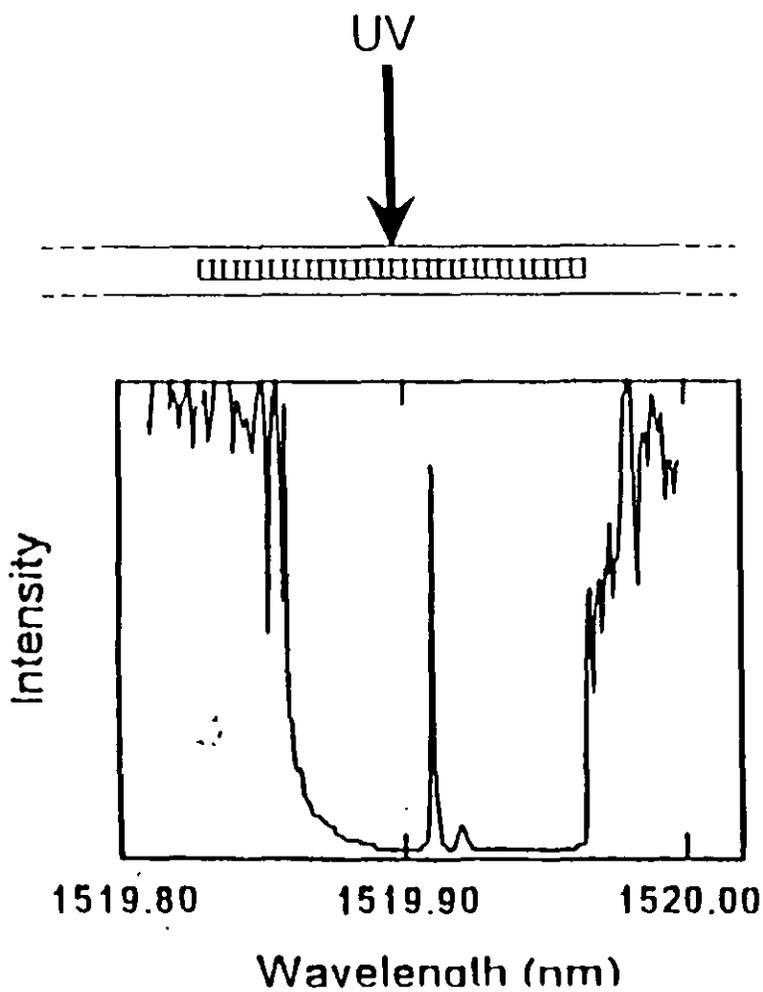


With Apodization

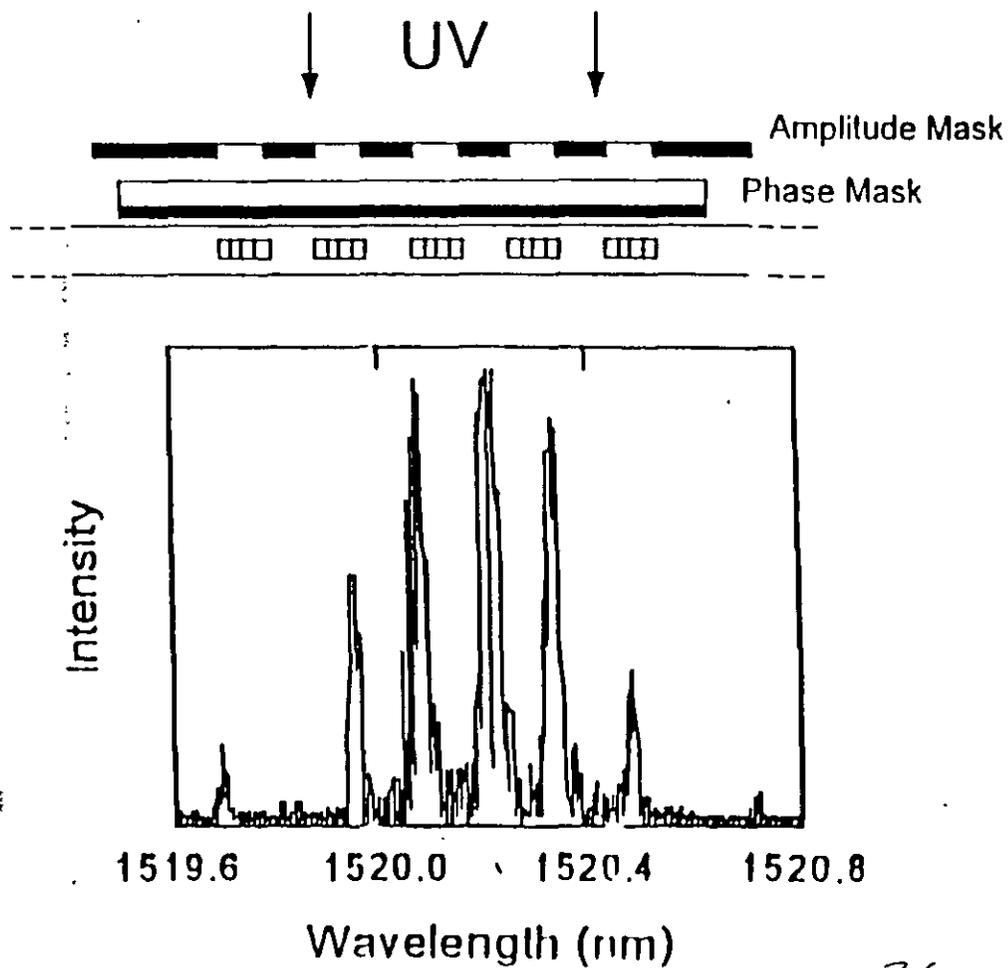


Phase Shifted & Sampled Fiber Gratings

Phase Shifted Grating

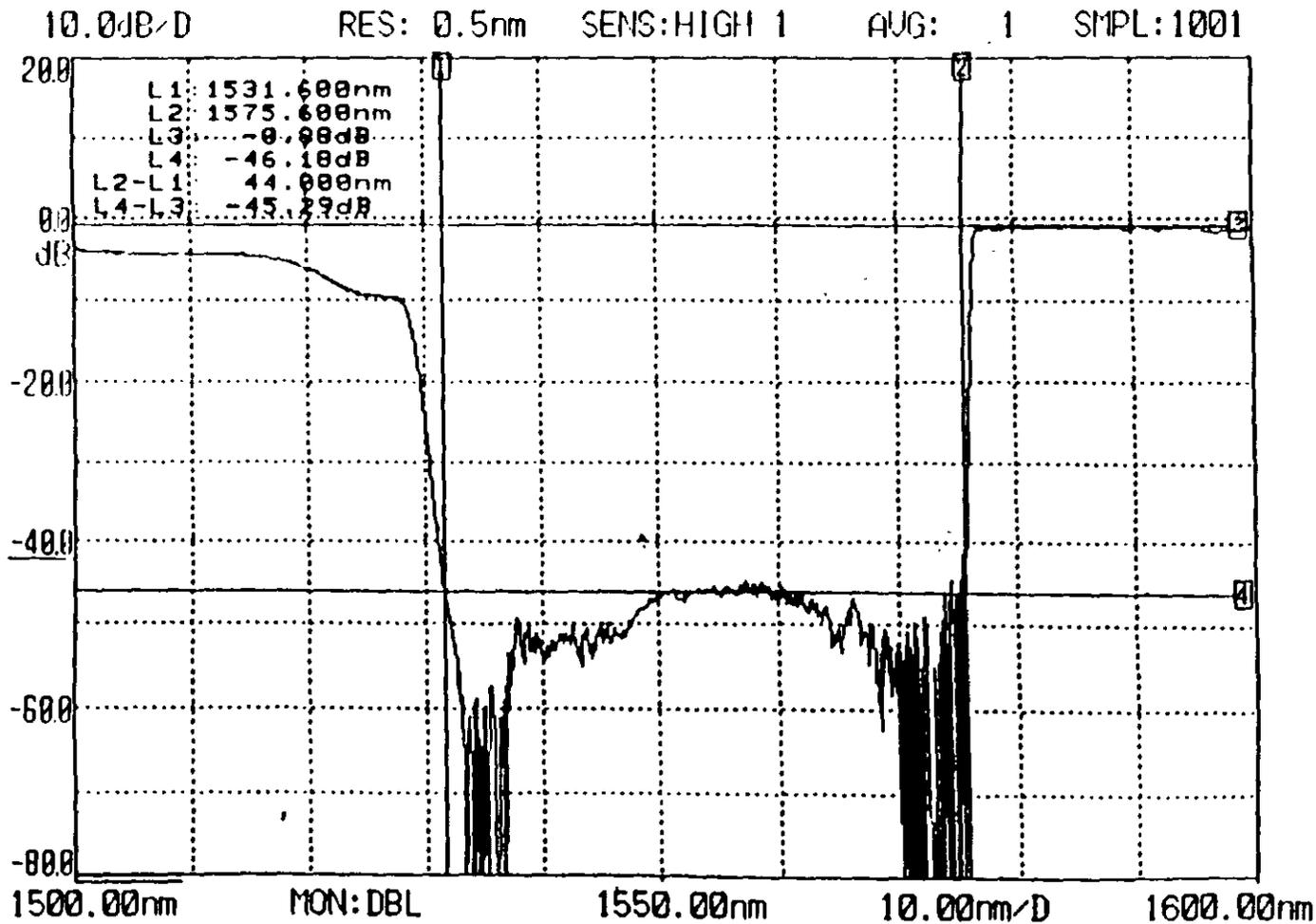


Sampled Grating



Bandstop Filter

Made with highly chirped phase mask



Insertion Loss -45 dB
Bandwidth 44 nm

Methods for Making Chirped Gratings

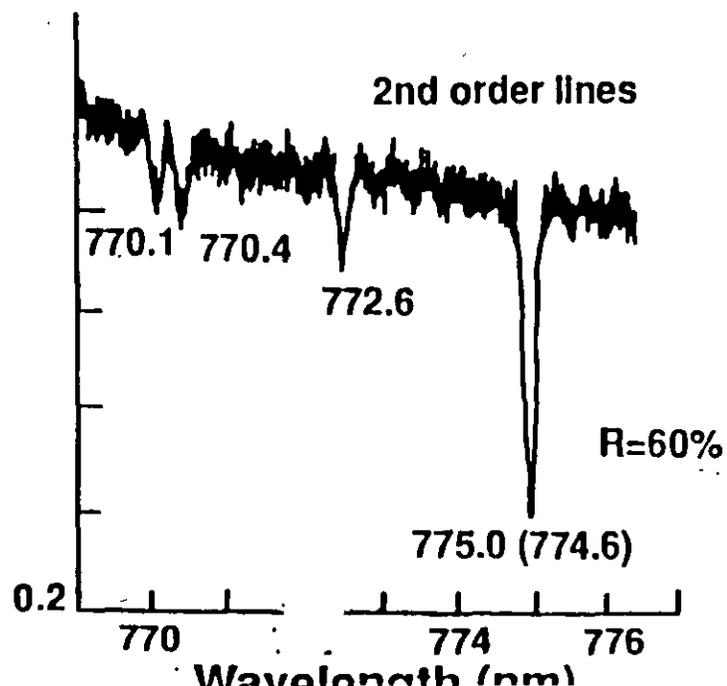
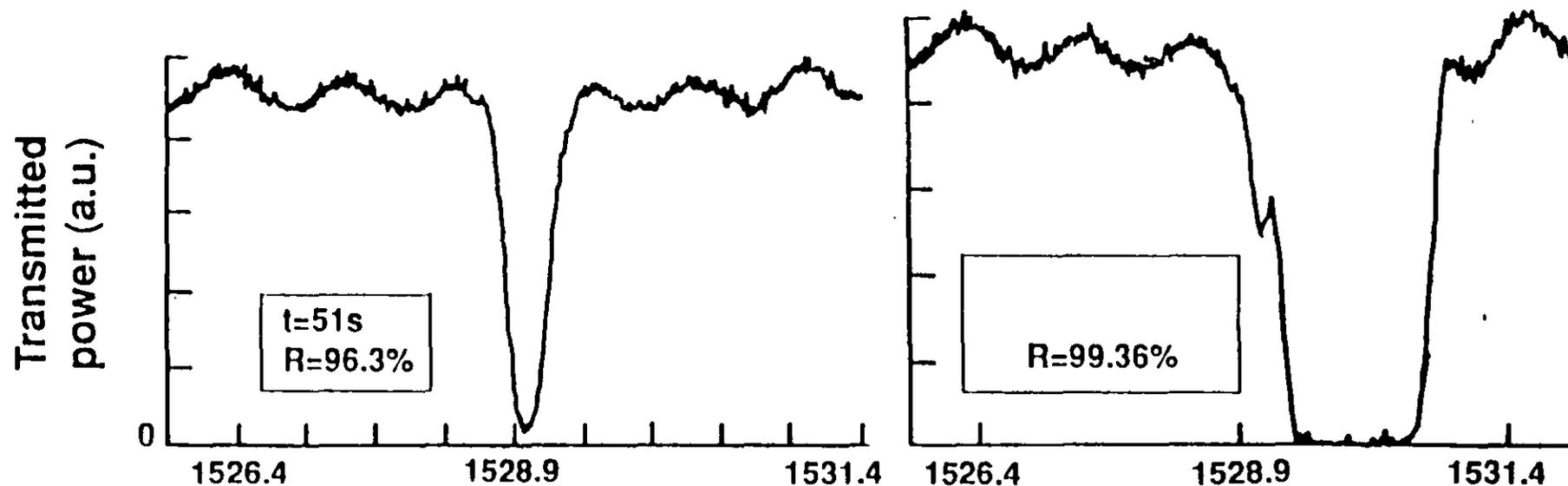
1. Two beam interferometer with lenses.
2. Ramp exposure added to original exposure.
3. Bend fiber in interference fringe field.
4. Germania diffusion to vary n_{eff} .
5. Tapered fiber to vary n_{eff} .
6. Mask with angled fiber and lens.
7. Chirped mask.

Post Exposure

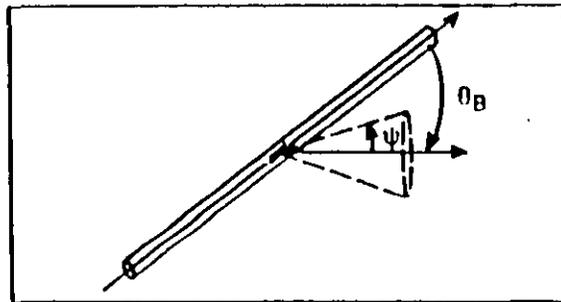
1. Bonded fiber with mechanical deformation.
2. Temperature gradient along fiber.
3. Etched fiber to vary n_{eff} .

FBG SPECTRA

Saturation

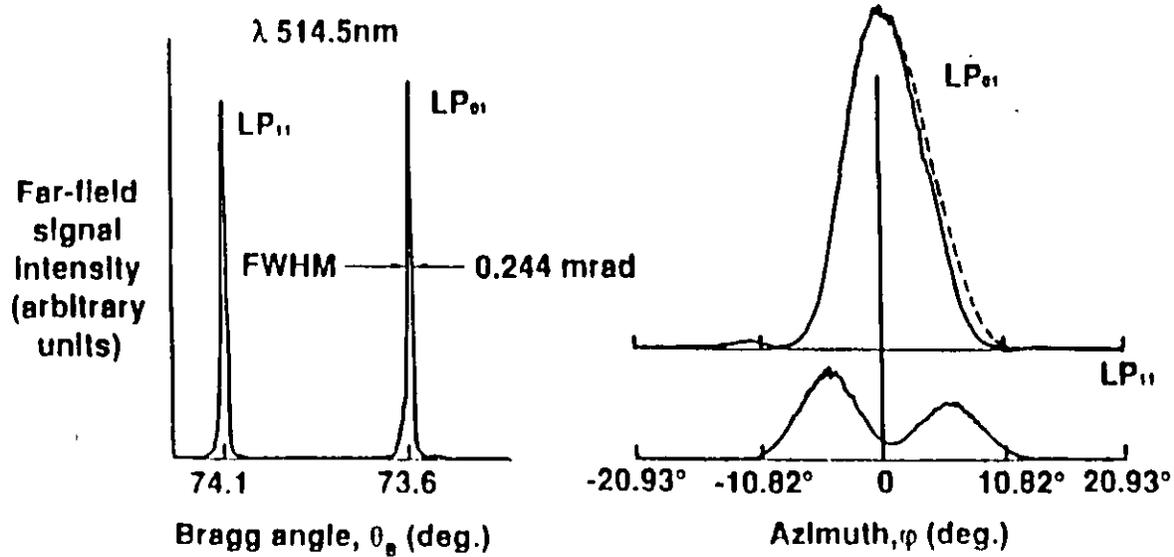


RADIATION PATTERNS FROM A FIBER BRAGG GRATING TAP



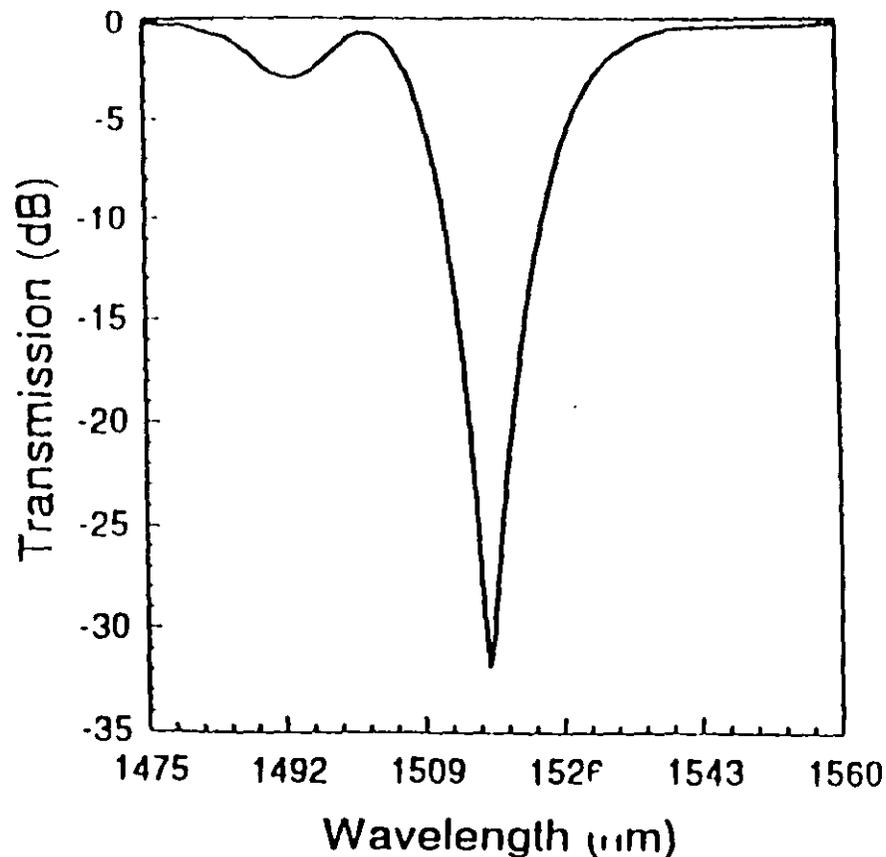
Computed ---
 Measured —

$L=13\text{nm}$
 $NA=0.236$
 $d=2.4\mu\text{m}$

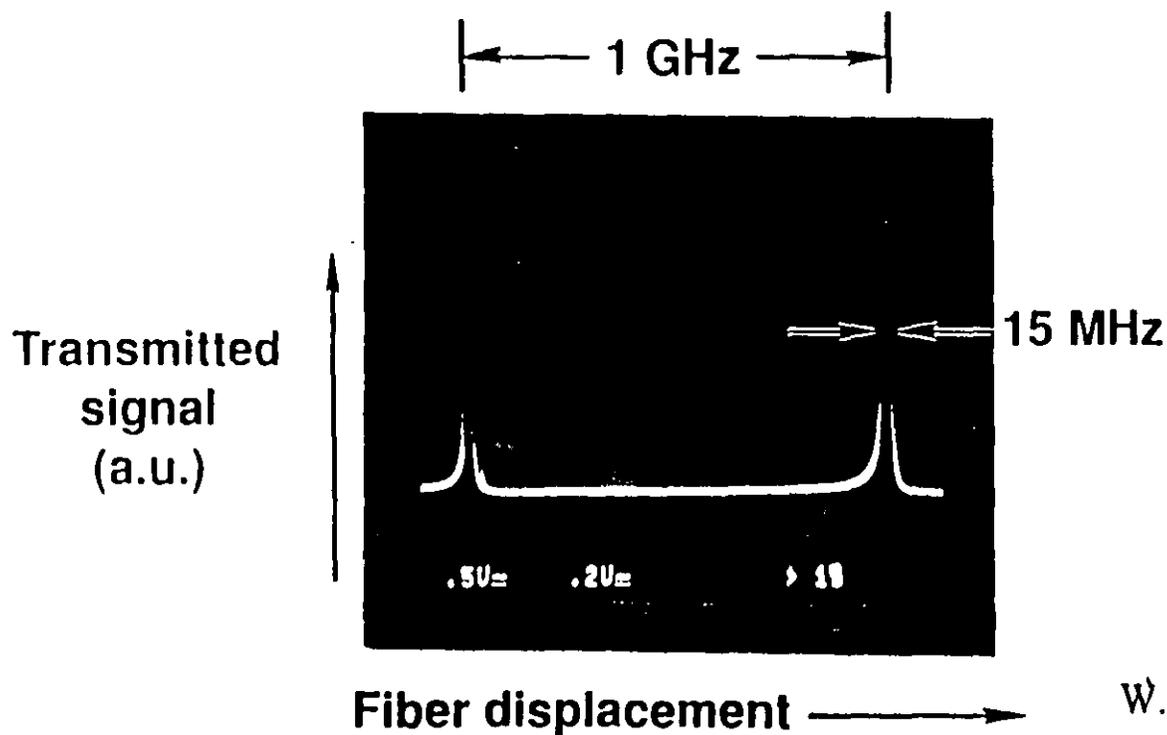
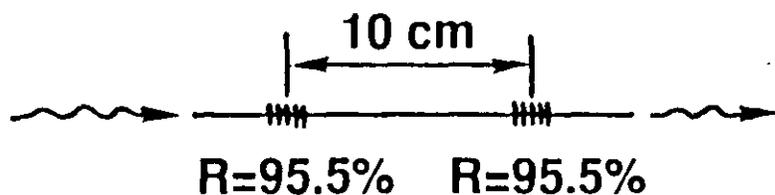


Loss Filters

Transmission Spectrum of Long Period Cladding Mode Grating



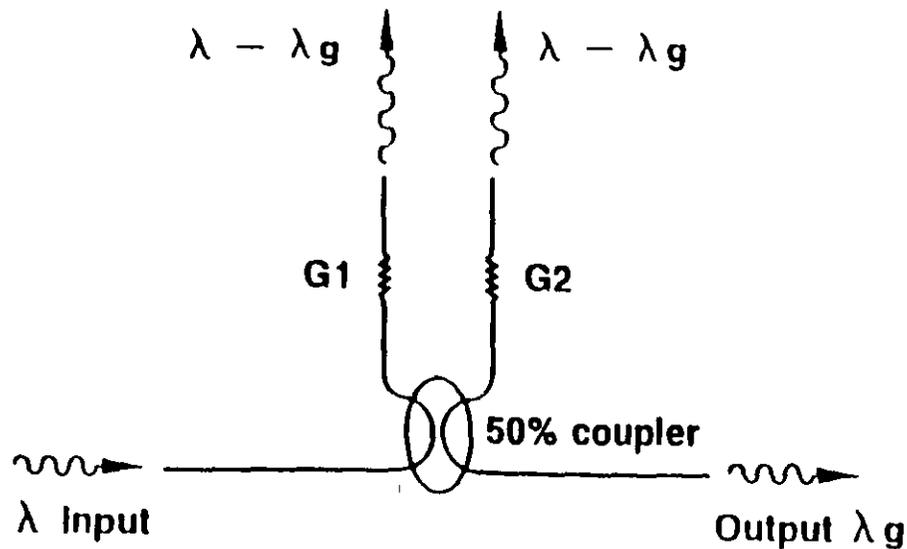
Fiber Fabry-Perot Filter



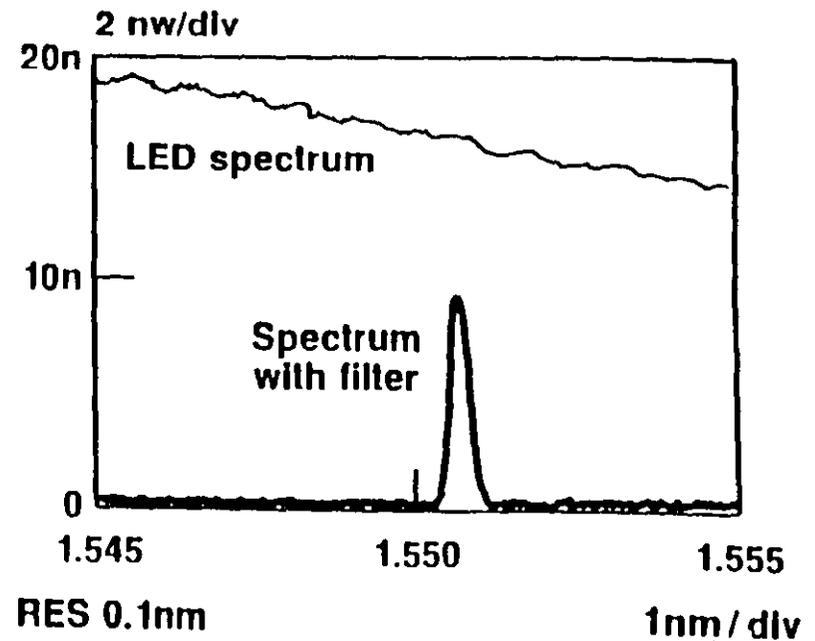
W.W. Morey, et al., OFC '92
paper WA2

Bandpass Filter

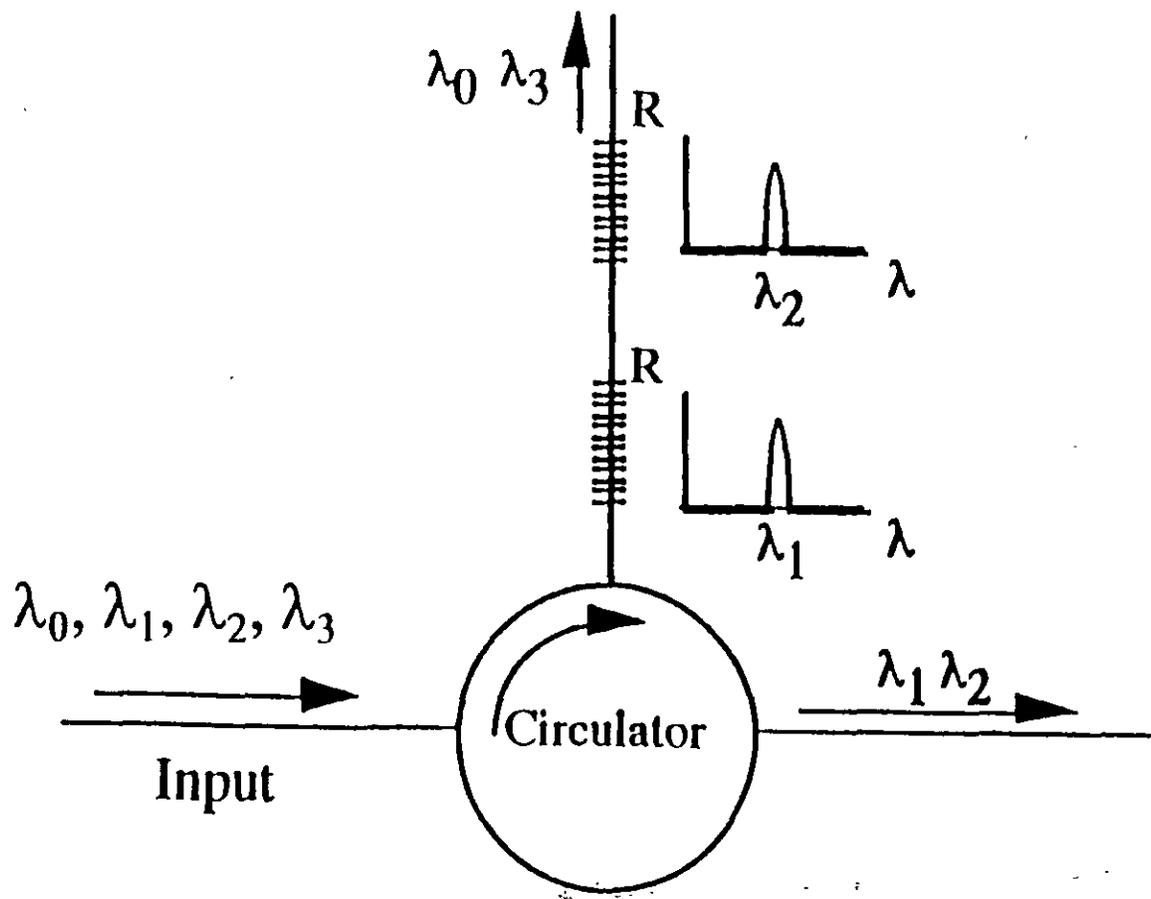
Michelson Arrangement



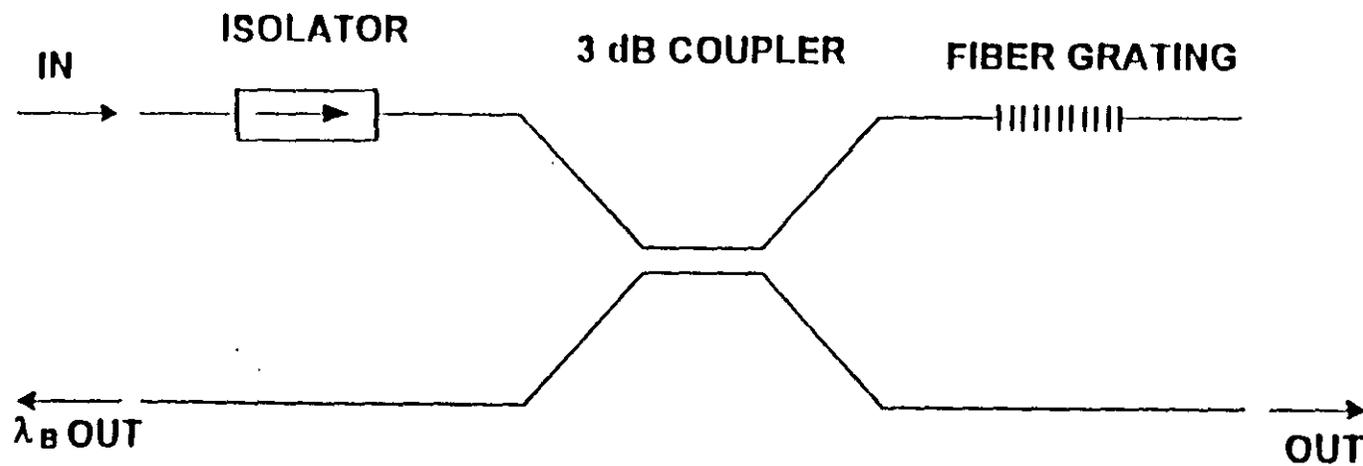
Spectrum of LED with and without the bandpass filter



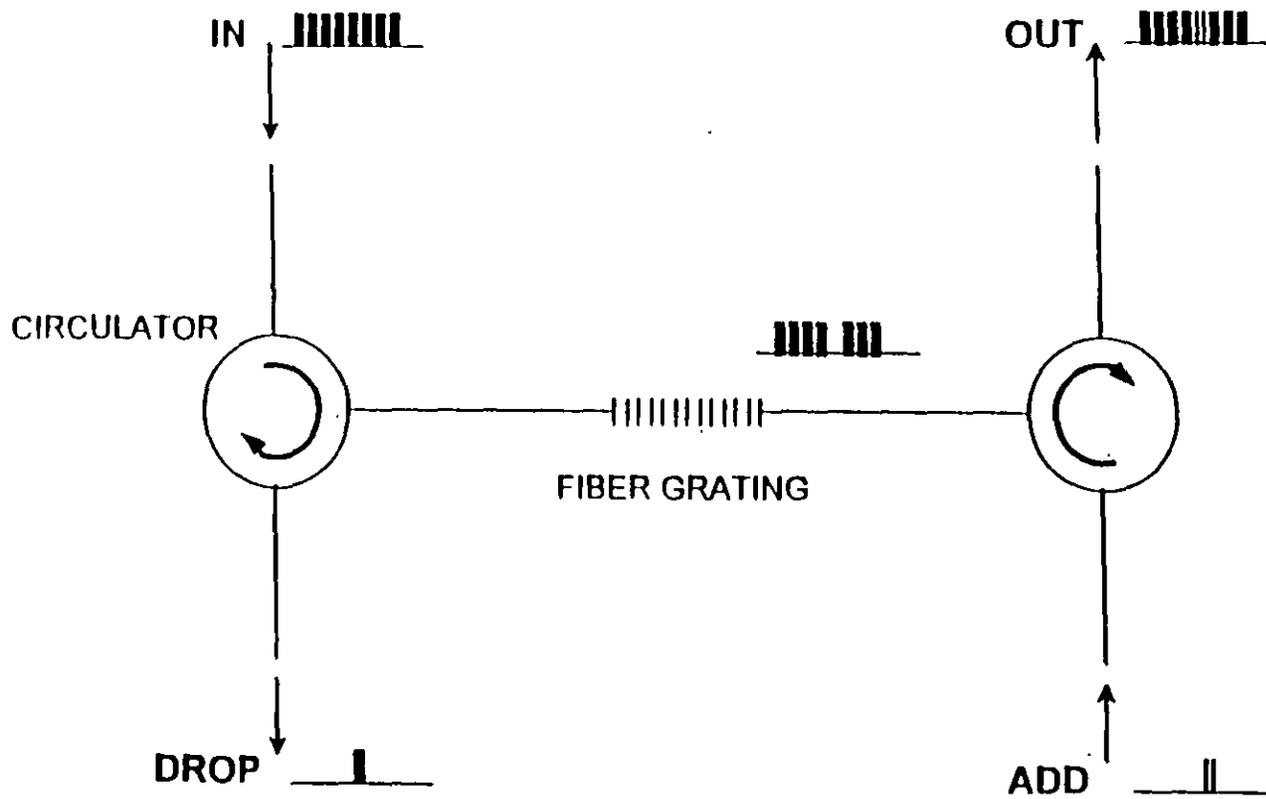
Bandpass Filter with Circulator



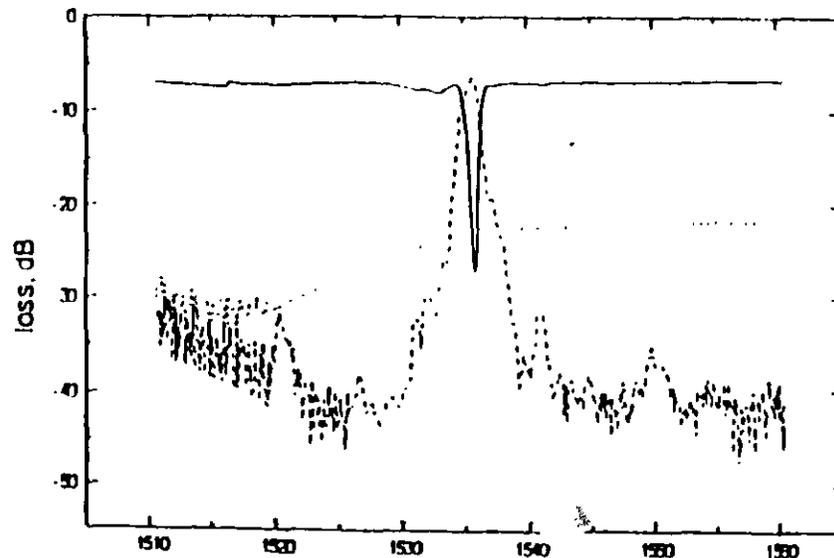
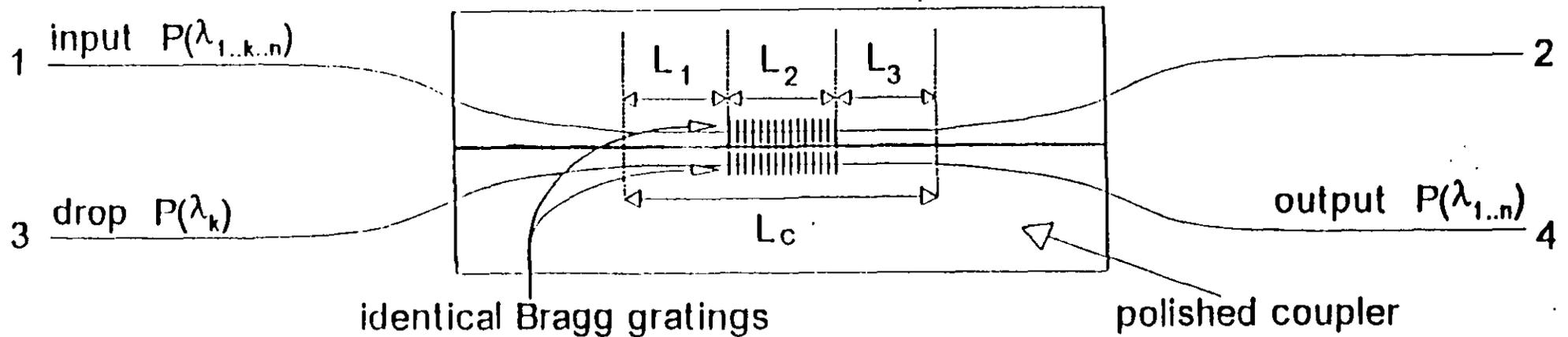
Channel Drop Filter



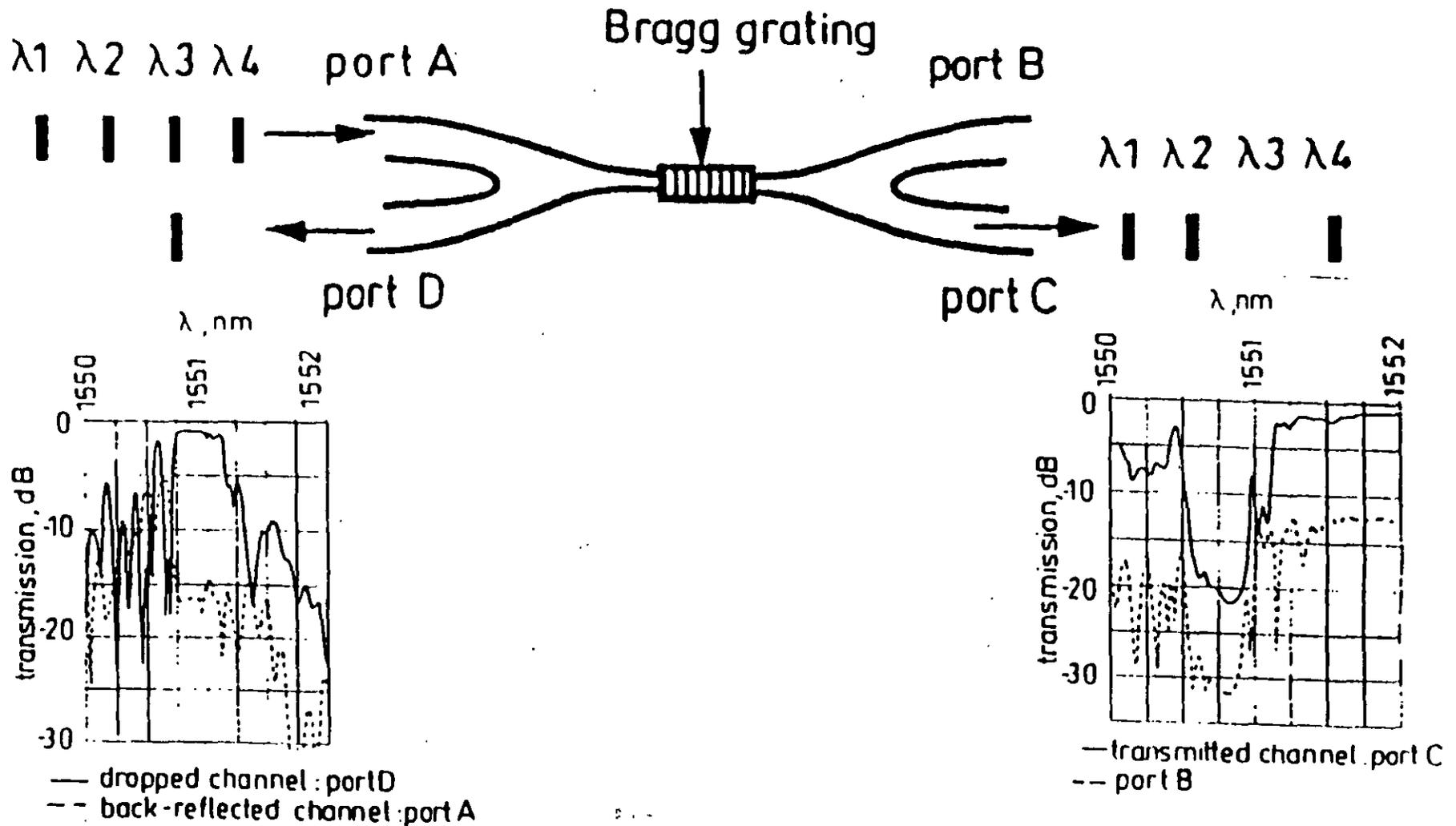
Drop-Add Filter with Circulators



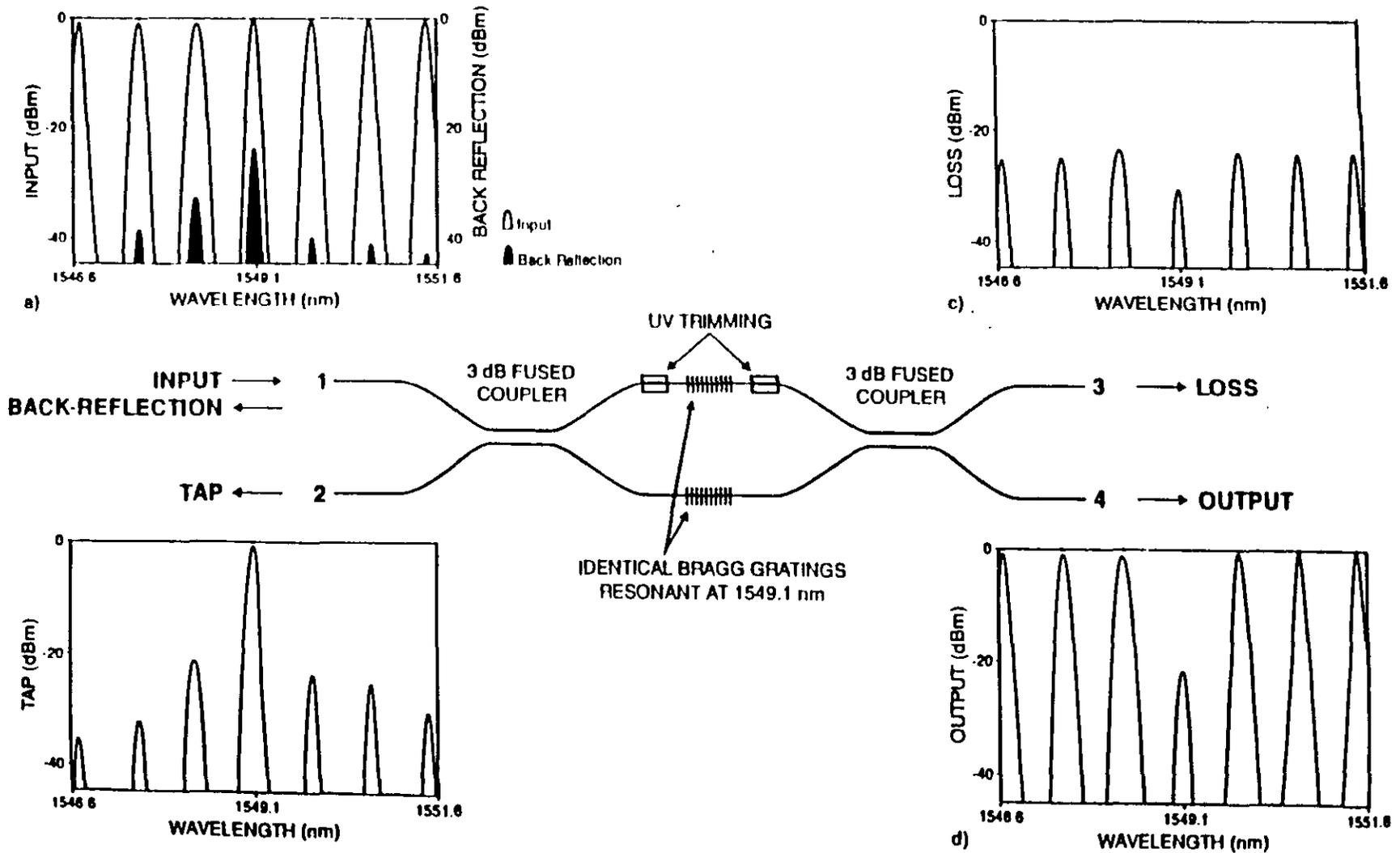
Drop-Add Filter with Polished Coupler



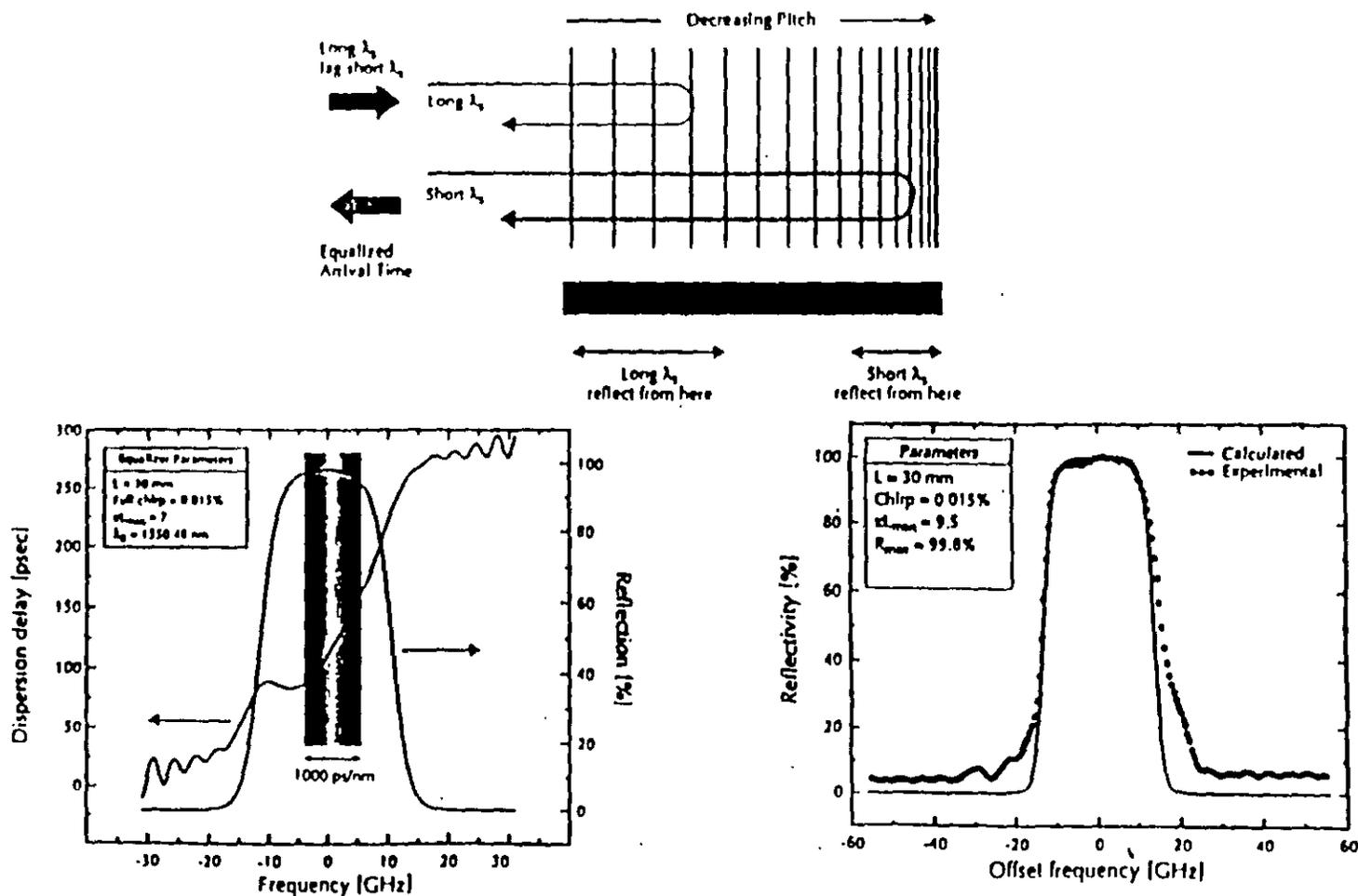
Add/Drop Filter: based on Bragg Grating Exposed in Fused Coupler



Drop-Add Filter with Fiber Mach-Zehnder



Dispersion Compensation



Ref: K. O. Hill

Effect of Temperature on Fiber Gratings

$$\delta\lambda/\lambda = (\alpha + \zeta) \Delta T$$

α = expansion coeff. = $.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ for silica.

ζ = thermooptic coeff. for fiber core material.

= $6.7 \times 10^{-6} / \text{ } ^\circ\text{C}$ estimated with GeO_2 doping for
temperatures up to $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ *.

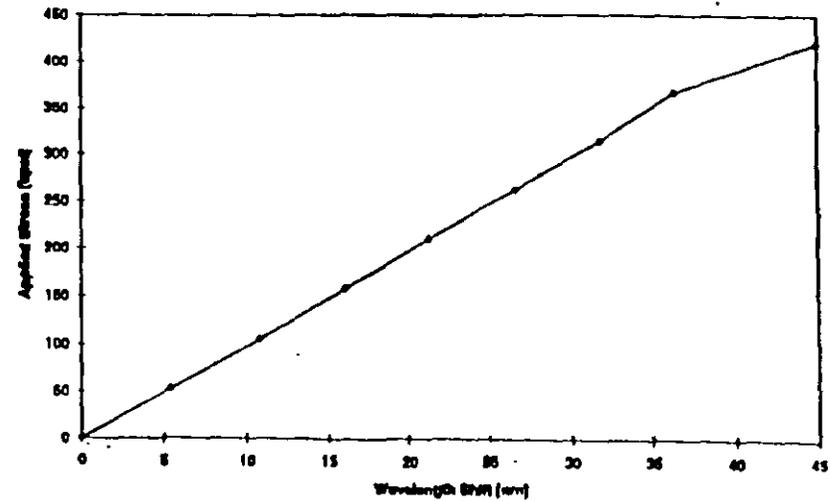
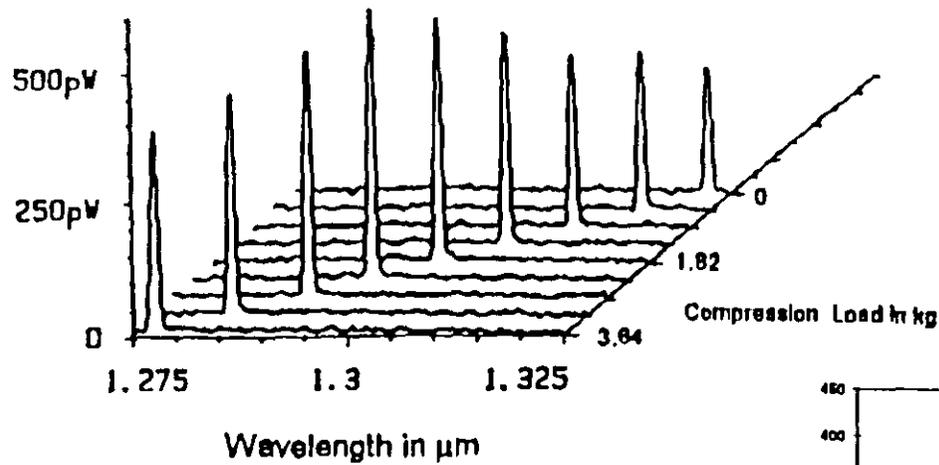
$$\delta\lambda / \lambda = 7.3 \times 10^{-6} / \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\delta\lambda = 0.011 \text{ nm} / \text{ } ^\circ\text{C} @ 1550 \text{ nm}$$

$$= 4.4 \text{ nm for } \Delta T = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

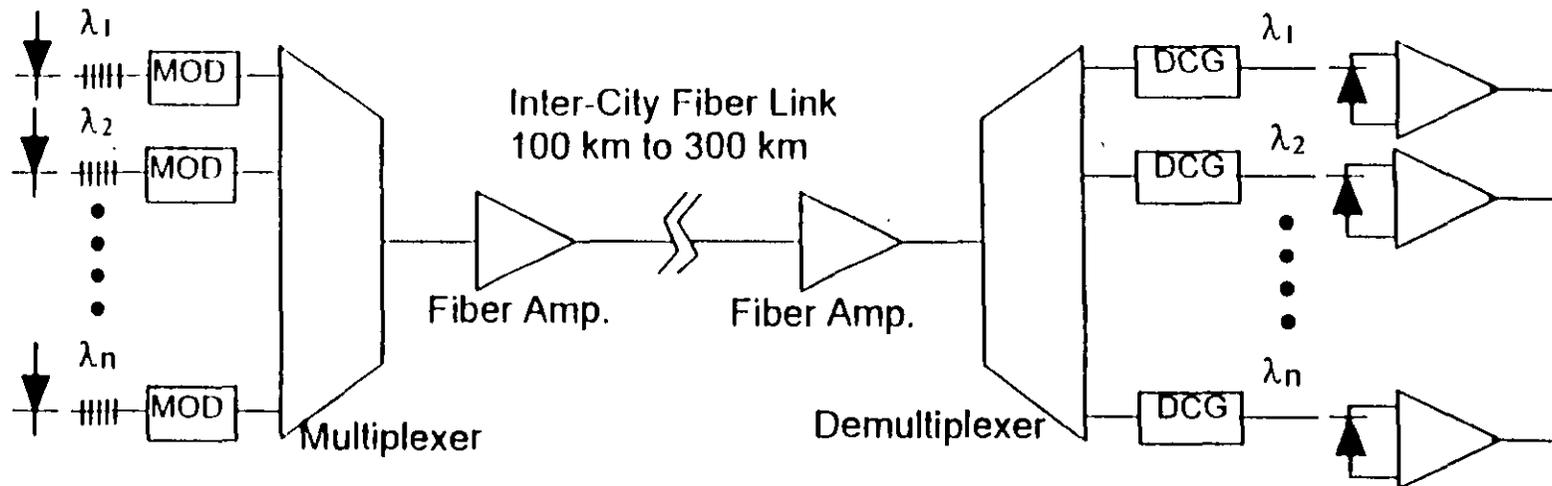
* From S. Tahahashi and S. Shibata, Jour. of Non Crysl. Solids, 30 (1979)
pp 359-370.

45 nm Compression Tuned Fiber Grating



Wavelength Division Multiplexed Fiber Optic Link

Wavelength Stabilized
Laser Sources



Fiber gratings can be used in:

1. Wavelength stabilized sources
2. Multiplexers and Demultiplexers
3. Fiber amplifiers (pump laser stabilization, pump folding refl., ASE filter, disp. comp., gain flattener, gain control.
4. Temp. sensor for PON
5. Line identifiers

**Information capacity per line:
Commercial Systems**

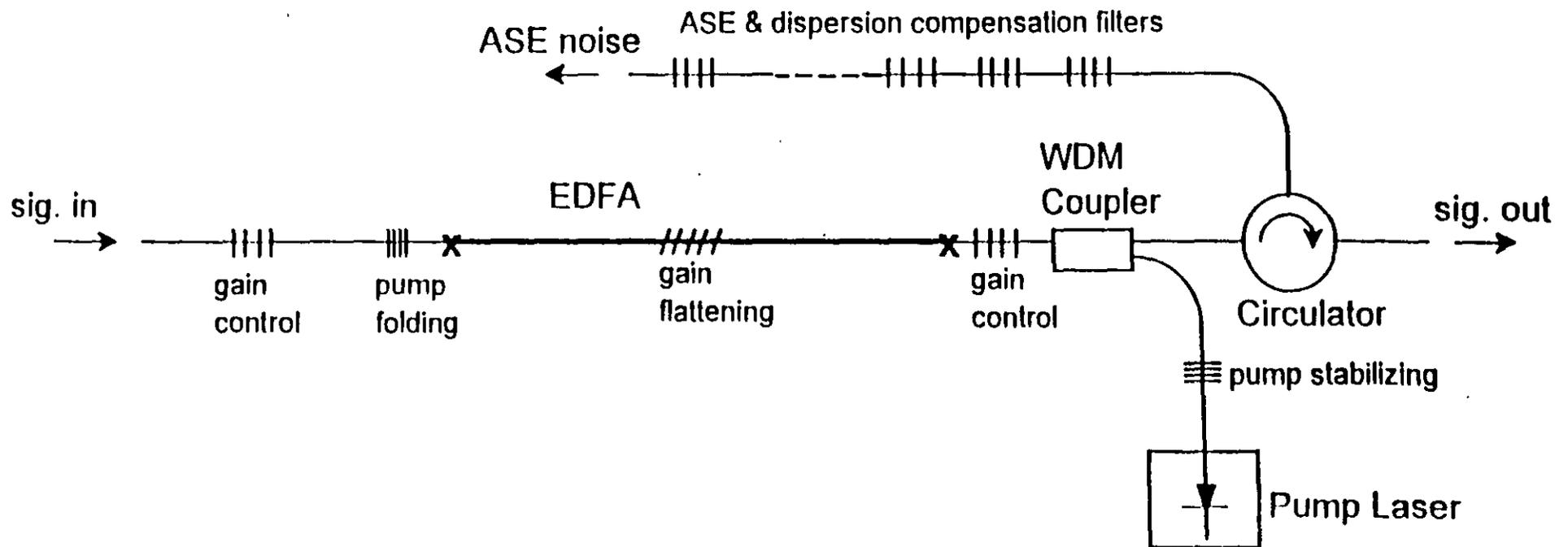
1997: 16 Channels at 40 Gb/s

1998: 40 Channels at 100 Gb/s

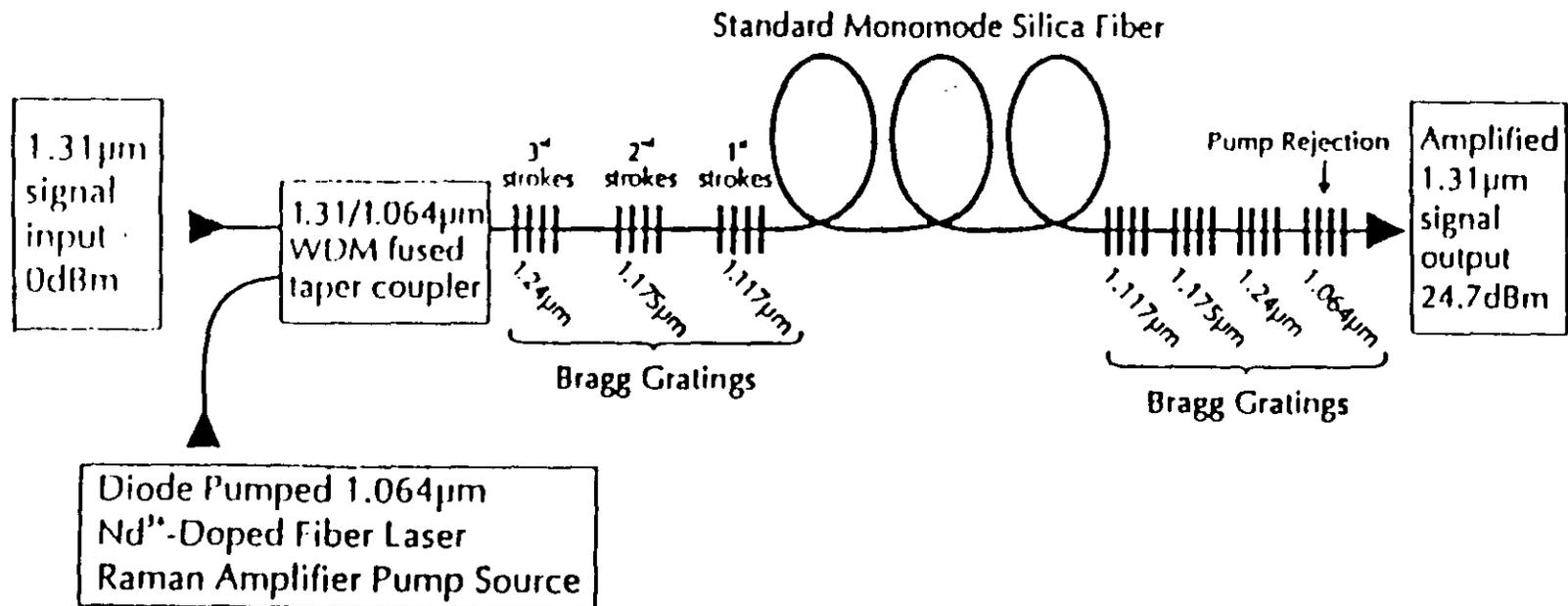
Lab demonstrations

1997: 100 Channels at 1Tb/s

Application of Fiber Gratings to EDFA

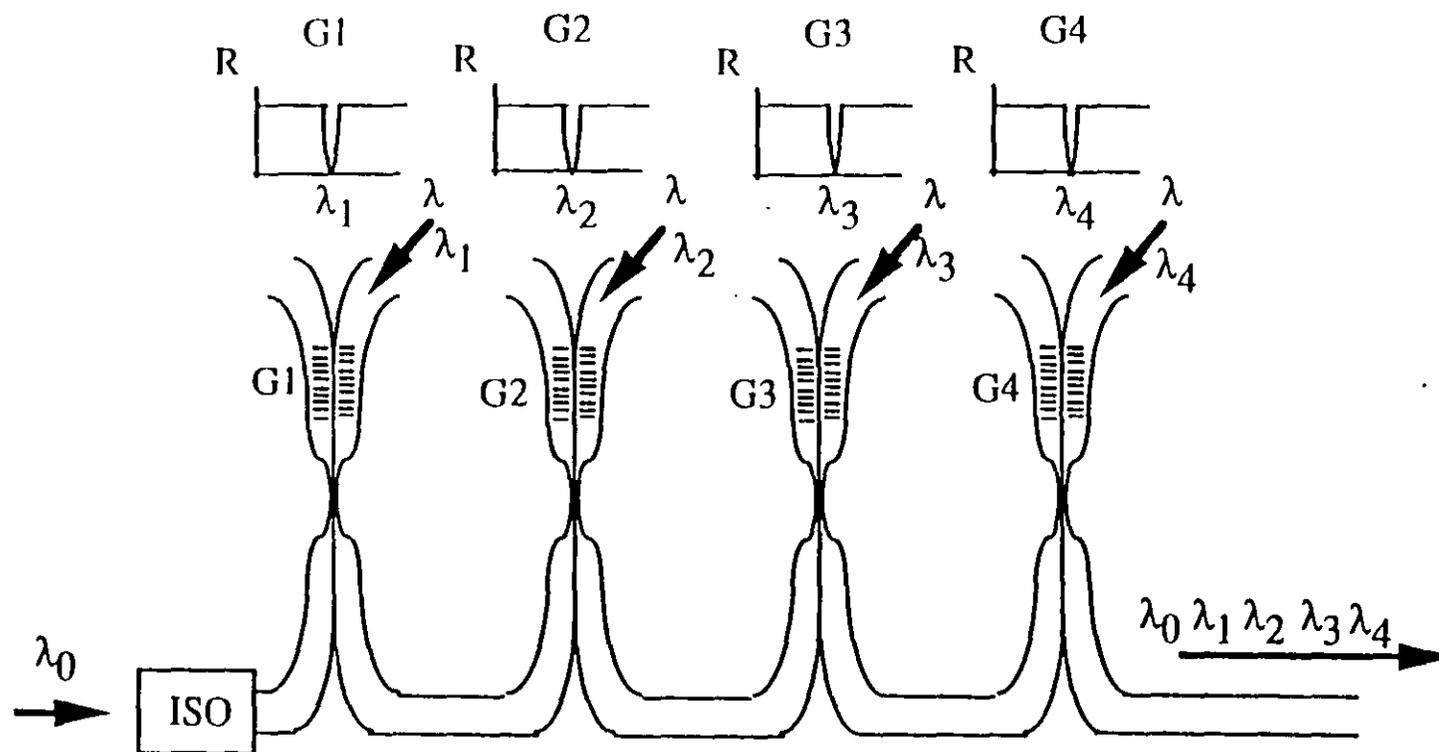


Grating Based Raman Amplifier

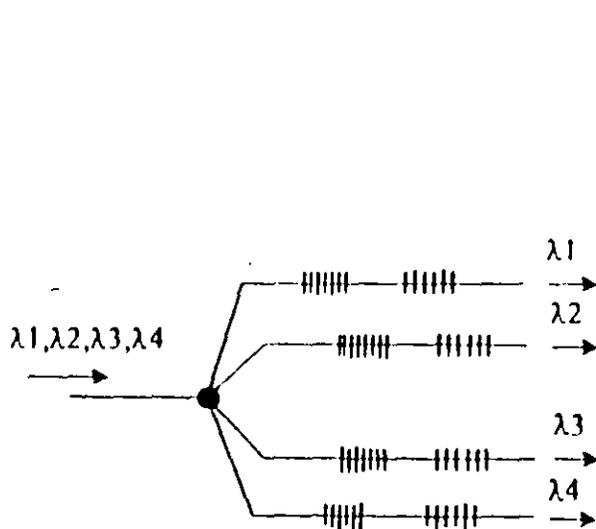


PRINCIPLE OF OPERATION: Cascaded conversion of the 1.064 μm pump by Resonant Raman Oscillation to 1.24 μm provides 24.7dBm of Raman gain at 1.31 μm

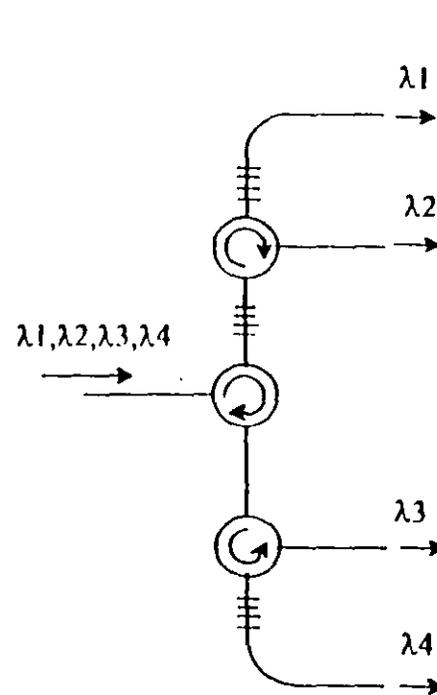
Efficient WDM Coupler



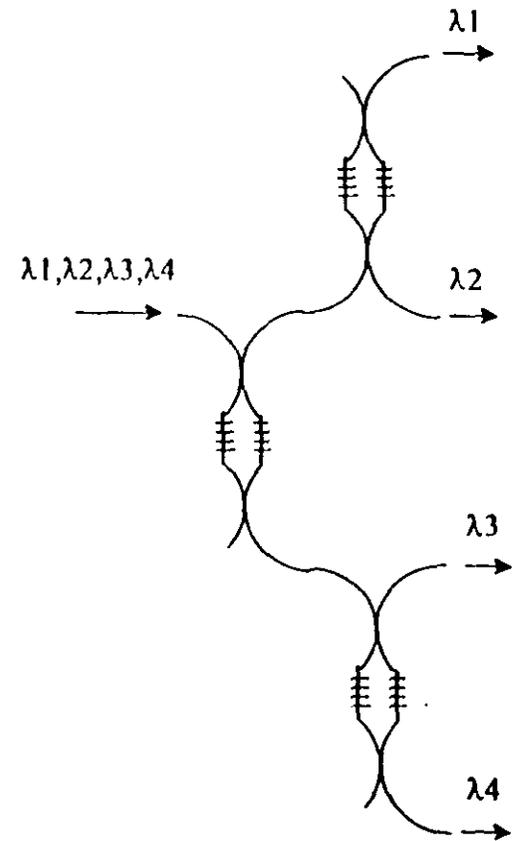
WDM Demodulation Schemes



Star Coupler



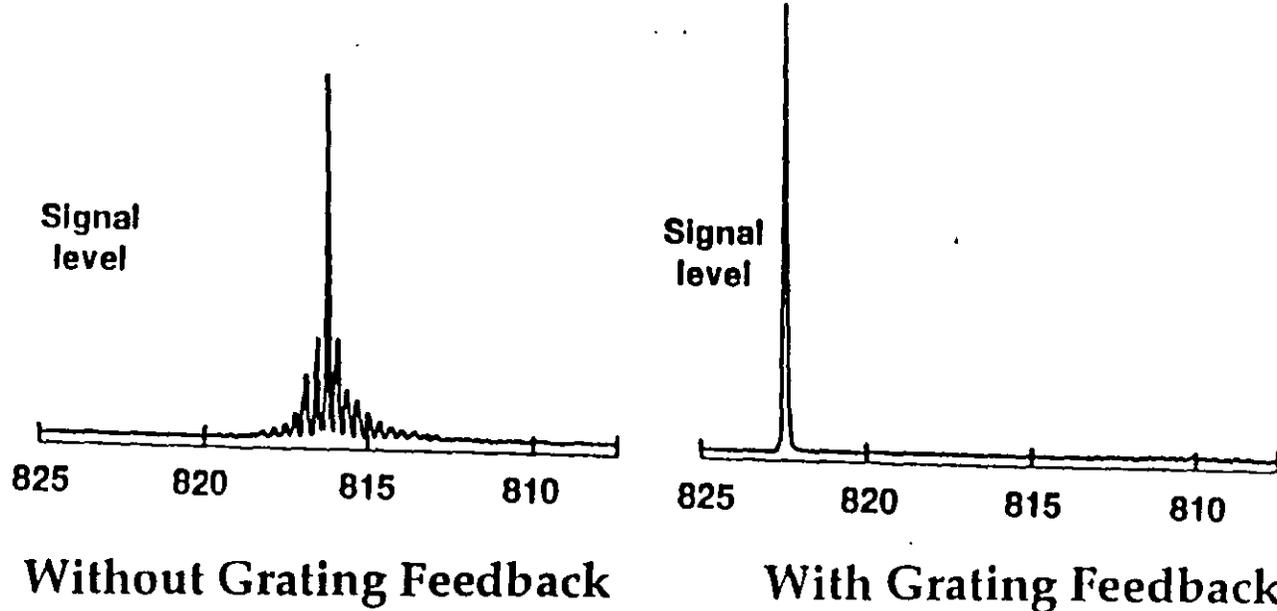
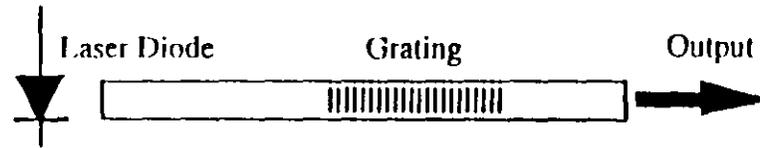
Circulator



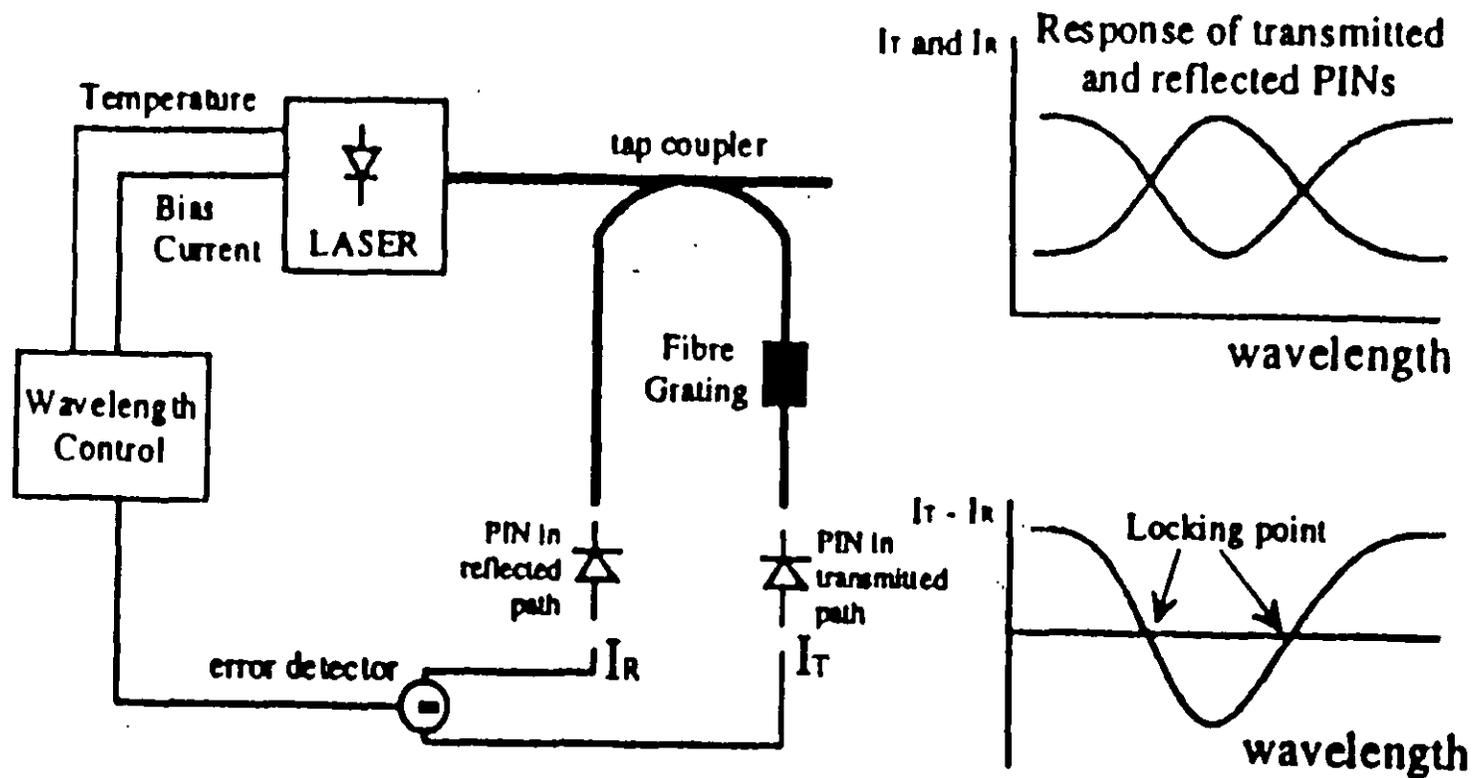
Mach-Zehnder

External Cavity Laser Diode

Emission Wavelength Control



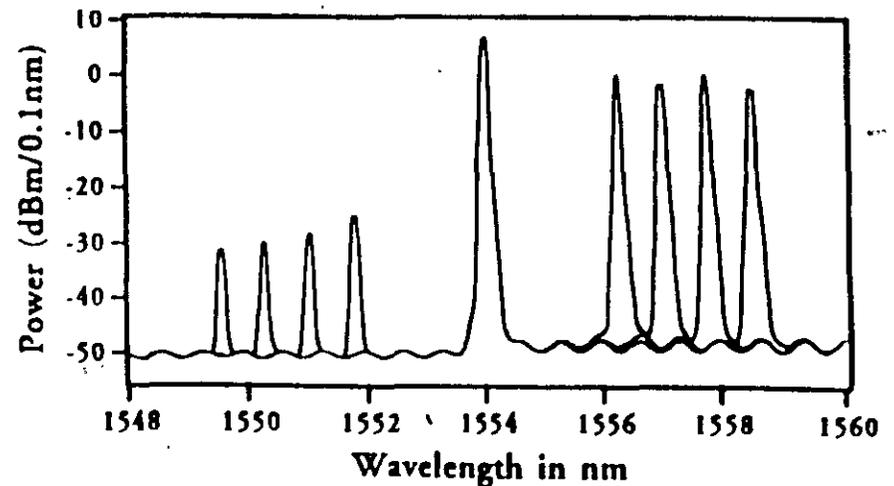
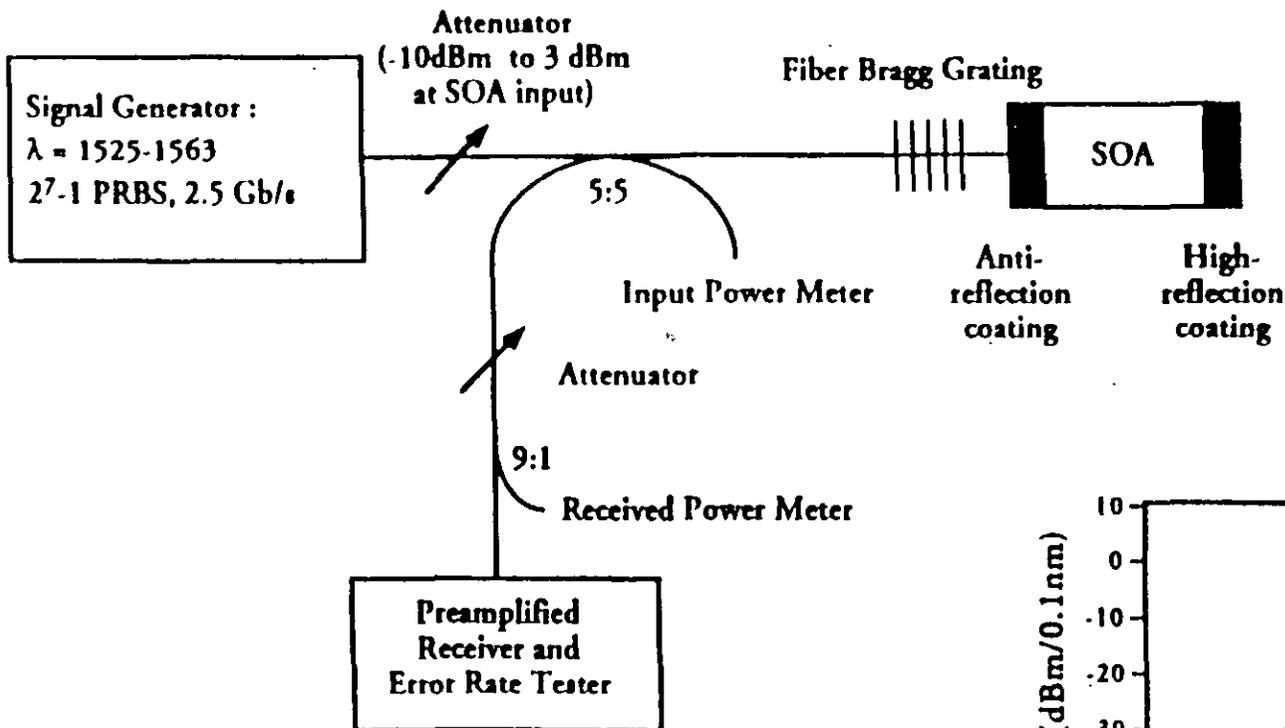
Cross-Over Stabilization Technique with FBG



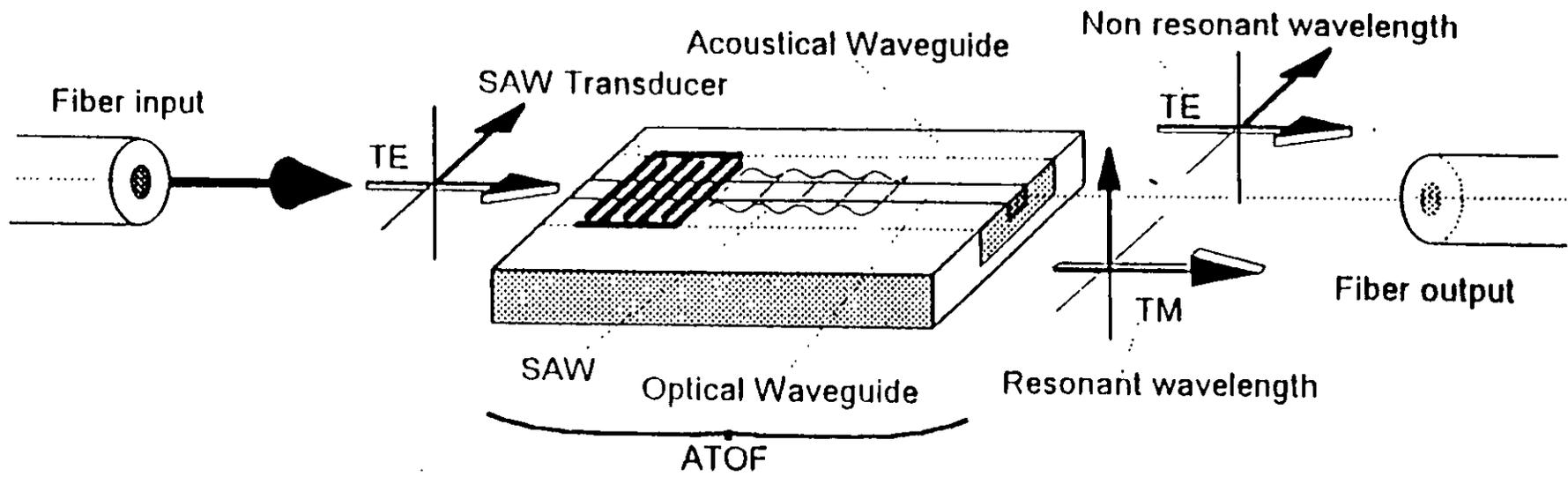
D. Forbes and A. Robinson; paper 13, IEE
Colloquium on Optical Fiber Gratings,
London, Feb.1997.

Wavelength Converter

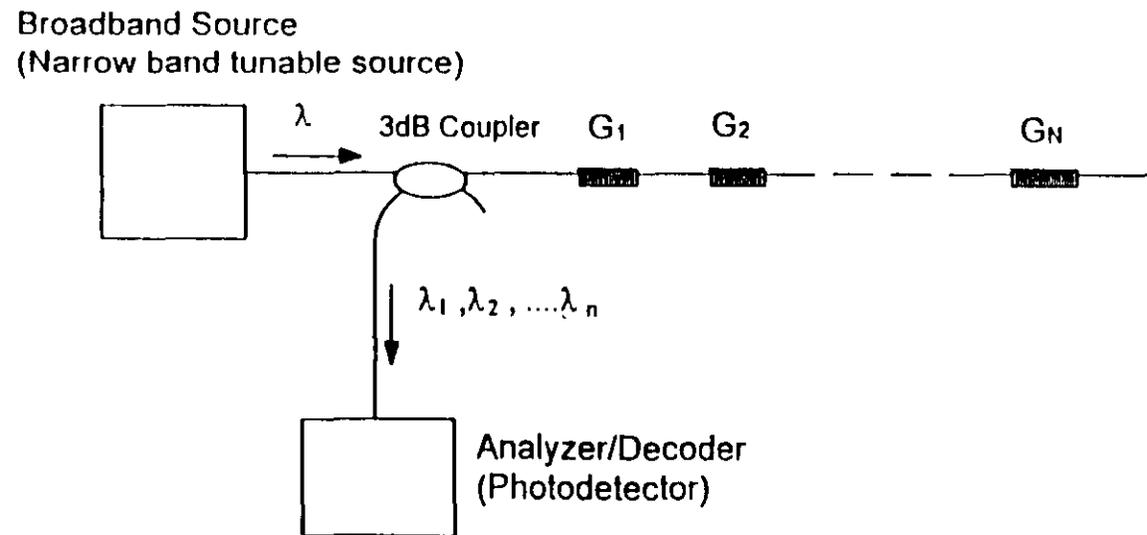
four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier



Acousto-Optical Tunable Filter



Fiber Grating Sensor System



Advantages of Fiber Grating Transducers

- * Wavelength encoded response.
- * Self referencing.
- * Linear output.
- * WDM & TDM multiplexing capabilities.
- * Small and robust.
- * High resolution, sensitivity and dynamic range.
- * Gauge lengths from 100 mm to 0.1 mm.
- * Insensitivity to EMI.
- * Compatible with fiber optic networks.
- * Ease of fabrication and mass production.
- * Durable over long tim

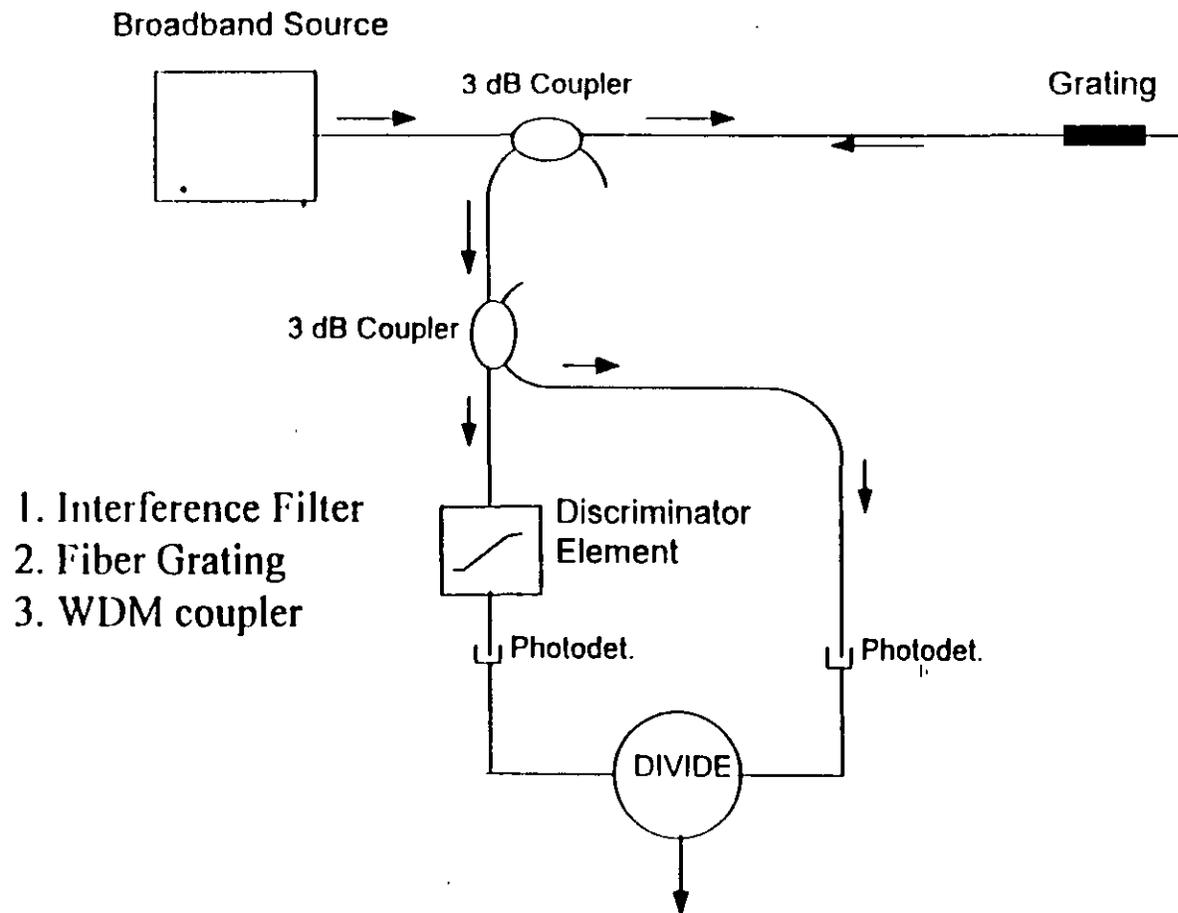
POSSIBLE FIBER GRATING SENSOR TYPES

Measurand	Transducing material	Application
Temperature	Metal, plastic	Power line sag, transformers, switches, generators, motors
Strain	Metal, plastic	Piping, structures
Pressure	Diaphragm, high ν plastic	Feed water, boiler systems, generators, turbines
Current	Met glass, nickel	Power lines, transformers, surge detection
Voltage	Piezoeletric, PVF₂	Power lines, transformers, high voltage structures

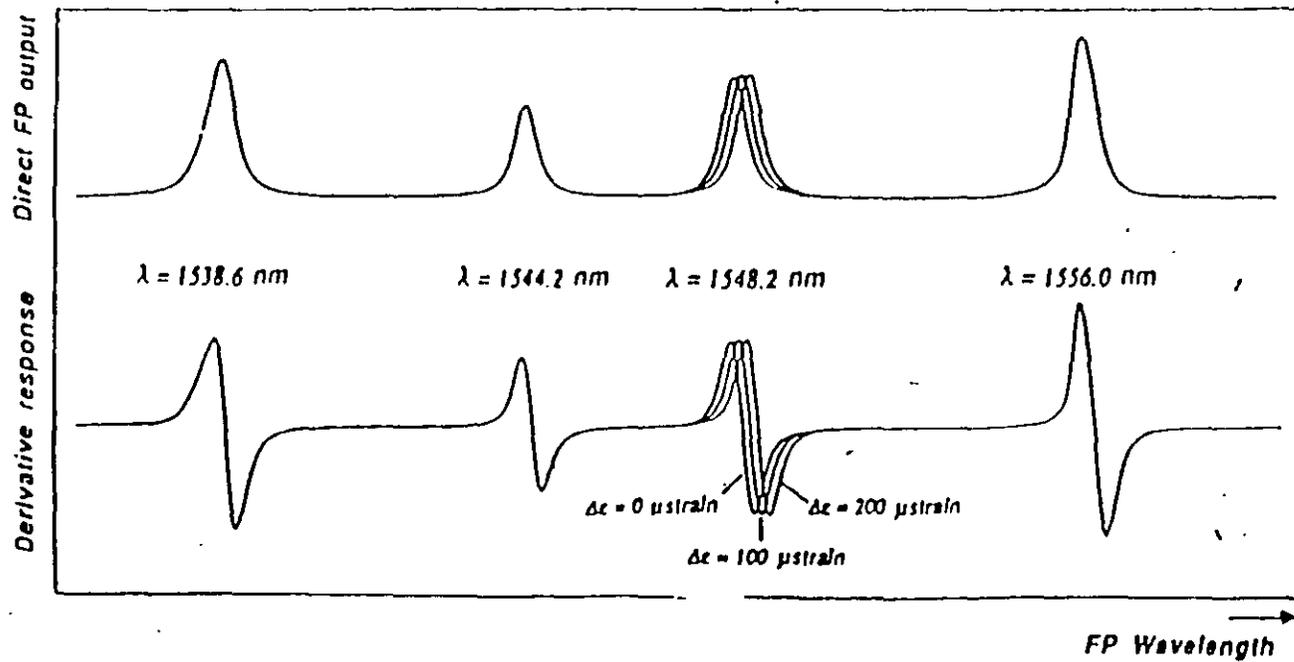
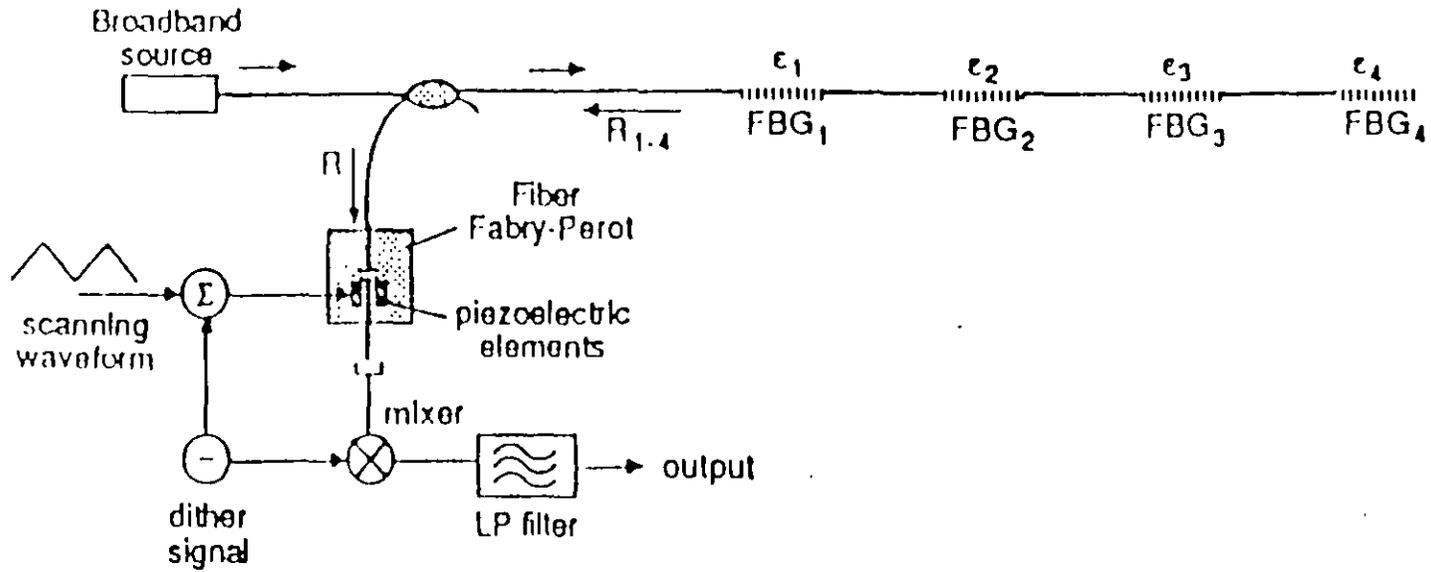
POSSIBLE FIBER GRATING SENSOR TYPES (Cont.)

<u>Measurand</u>	<u>Transducing material</u>	<u>Application</u>
Vibration	Metal, plastic	Piping, structures, generators, motors, turbines
Acoustic emission	Metal, plastic	Cracks, transformer discharge
Hydrogen	Paladium	Generators, containment vessels
Hydrocarbons	Platinum	Fuel leak detection
pH, CO ₂ , O ₂	Fluorescent indicators	Feed water, cooling water
Radiation exposure	-	Nuclear radiation environments

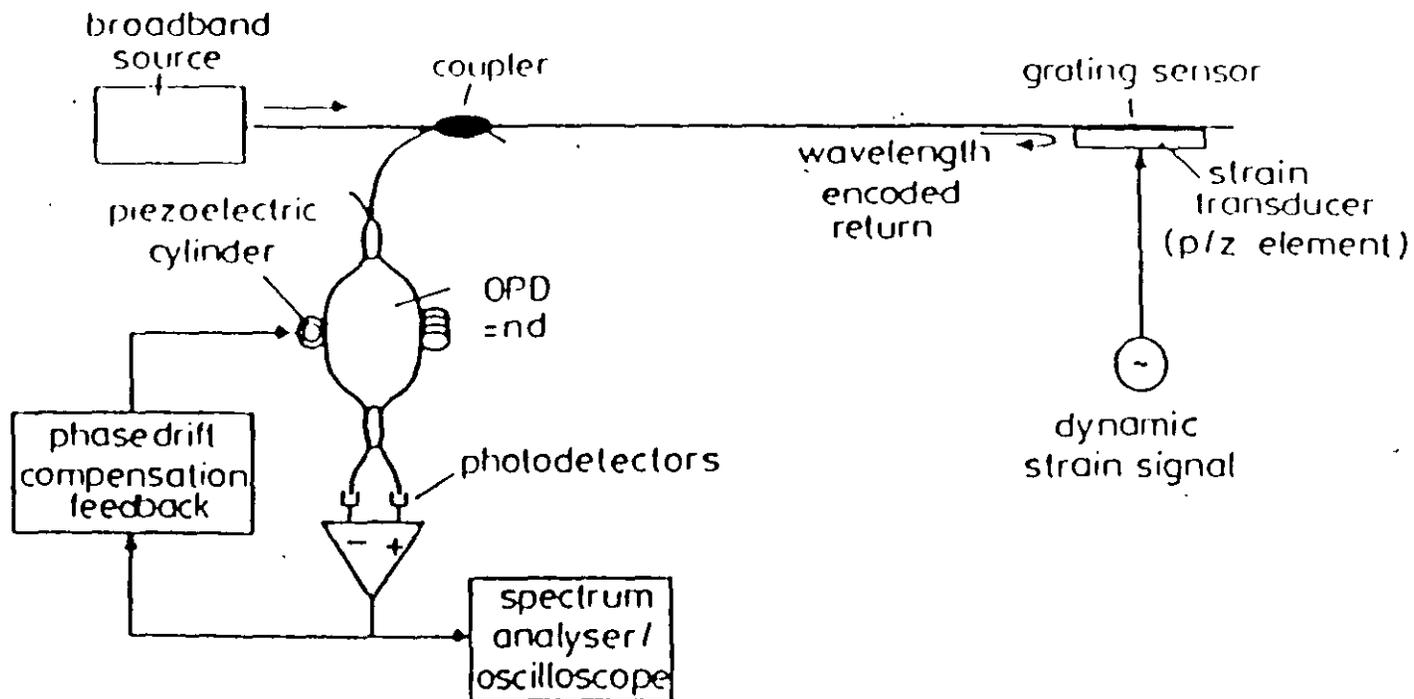
Decoding with a Discriminator Element



Fiber Bragg Grating Sensor Array with Fiber Fabry-Perot Demodulator



Grating Sensor with Fiber-Interferometric Wavelength Discriminator



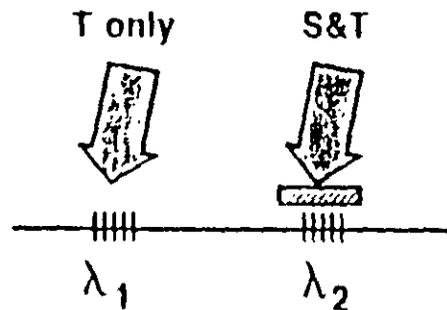
Min. Det. Strain = 0.6 nanostrain at 1 Hz BW
 Min. Det. Bragg Wavelength Shift = 0.7×10^{-6} nm
 @ 1550 nm

A.D. Kersey et al. Elect. Let. 28,236 (1992).

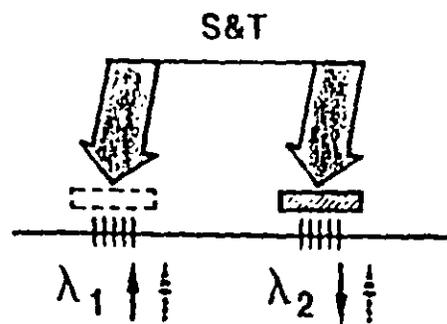
Separation of Temperature & Strain

- ☆ Separation of Measurands
- ☆ Dual Wavelength
- ☆ Embedded Sensor with Transverse Strain
- ☆ Tapered Fiber

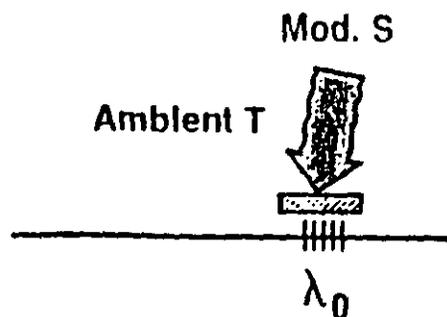
Separation of Temperature & Strain Effects by Separating Measurands



Separation of measurands

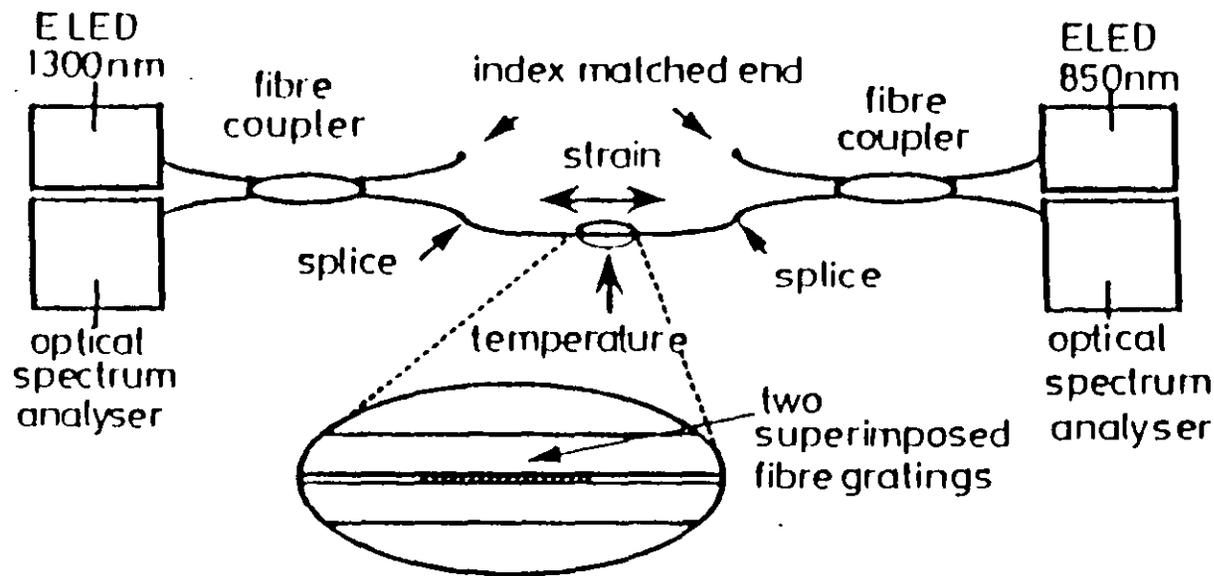


Differential measurand effect



Modulated or high frequency measurand

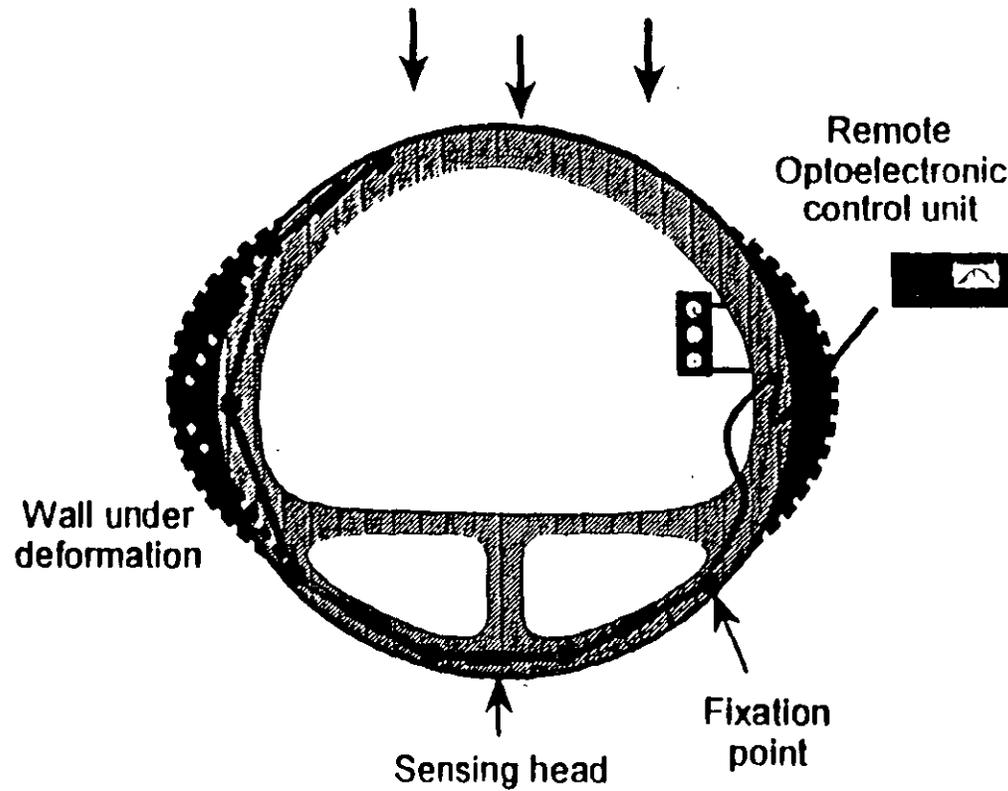
Separation of Temperature & Strain Using Dual Wavelengths



$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix}$$

M.G. Xu,, et al
 University of Southampton
 Elect. Lett. 30, 1085 (1995)

Mont TERRI road tunnel monitoring in Switzerland





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

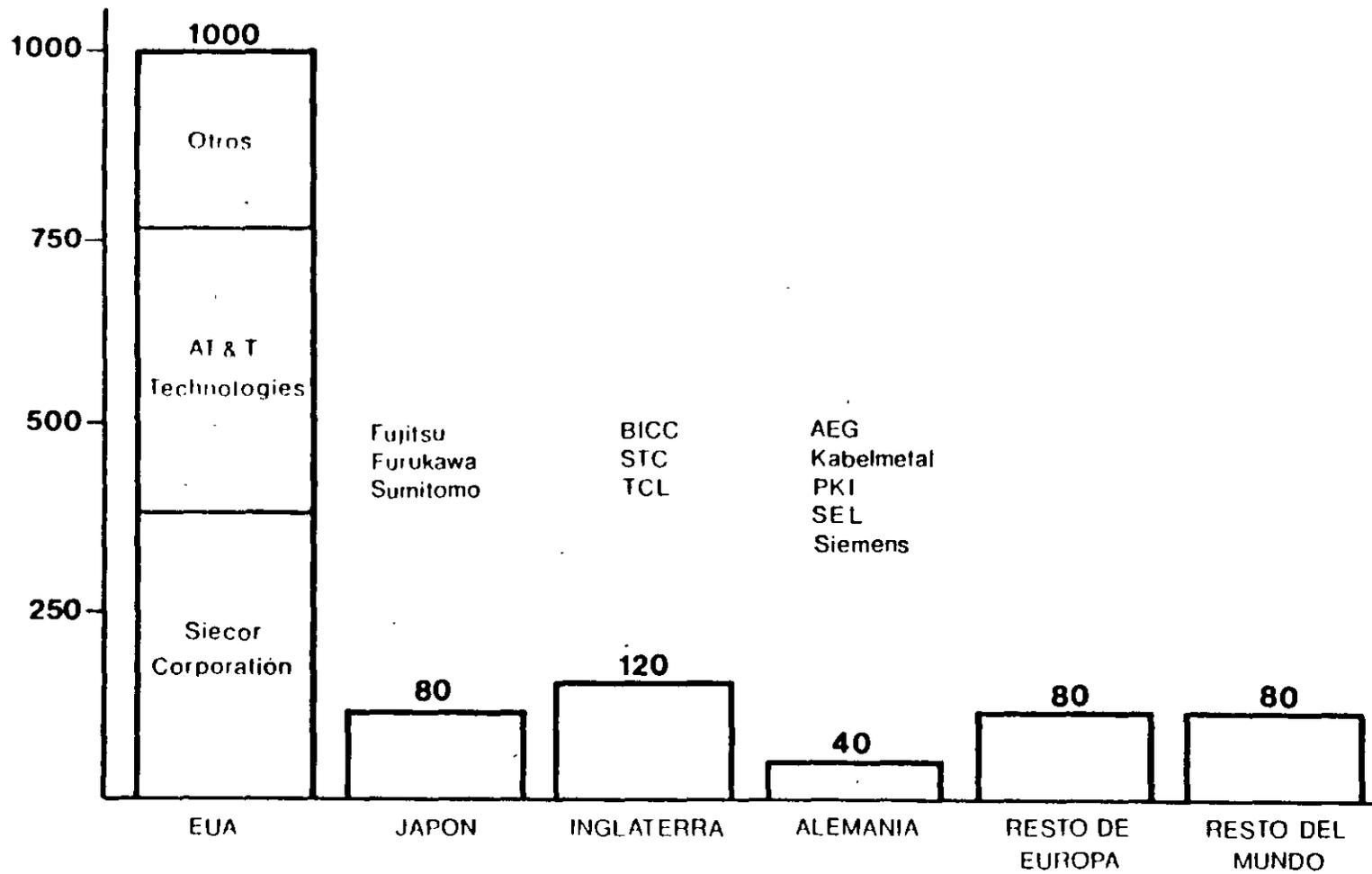
**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

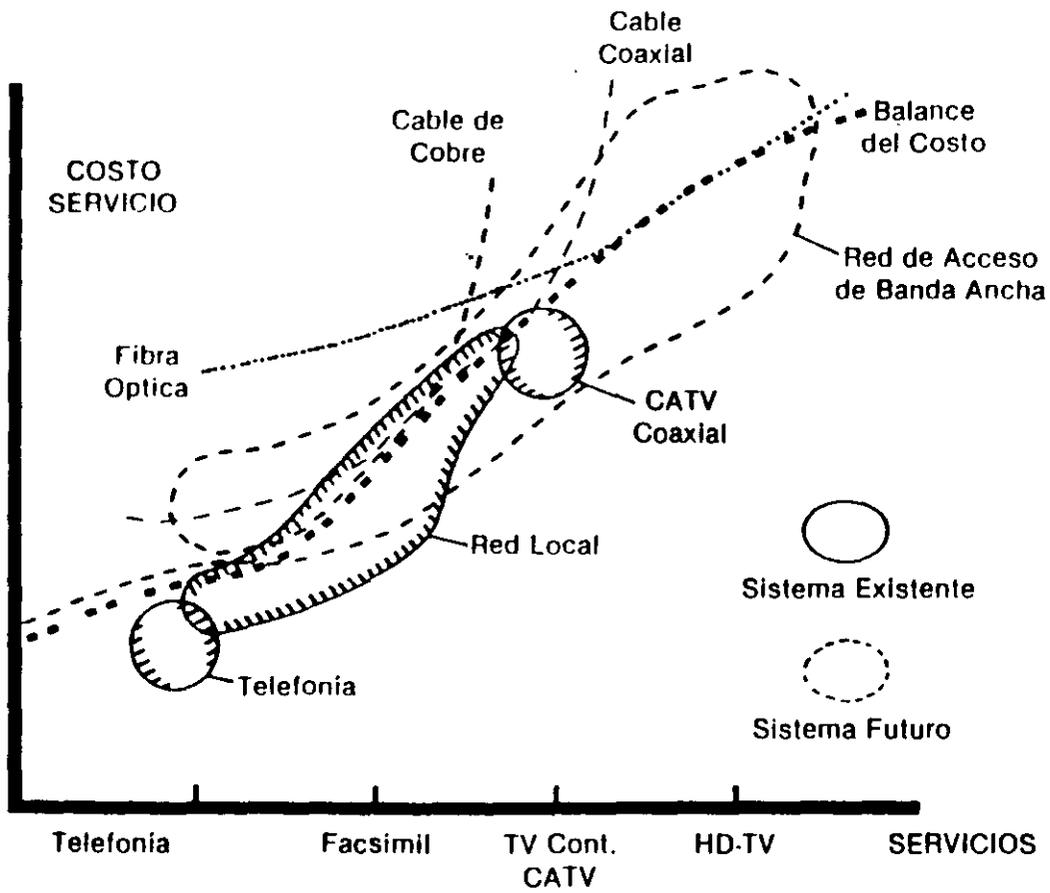
TEMA

REDES DE FIBRAS ÓPTICAS Y WDM

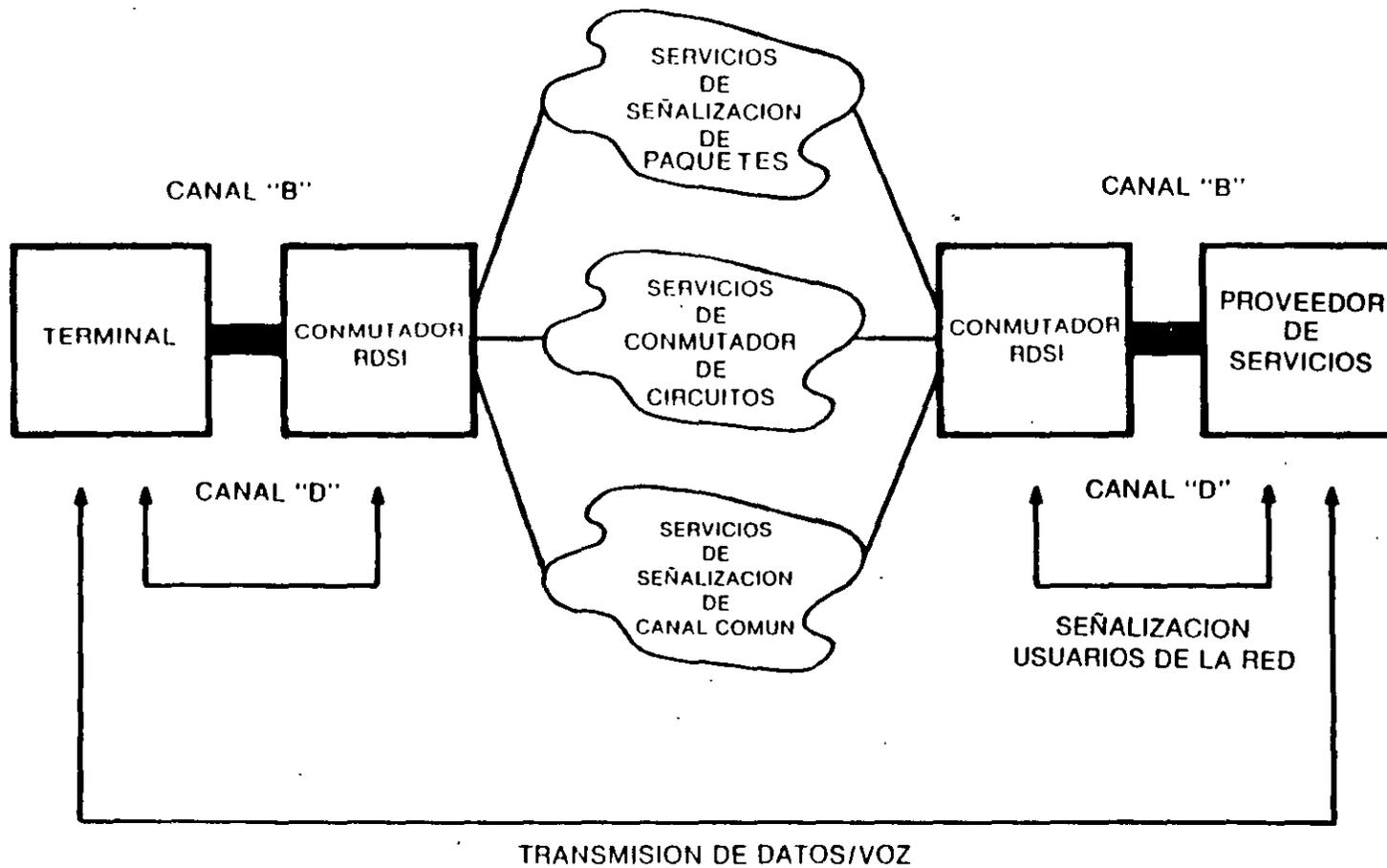
**EXPOSITOR: ING. GENARO CHÁVEZ DIAZ
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

FIBRAS EN CABLE
(Miles de Km)

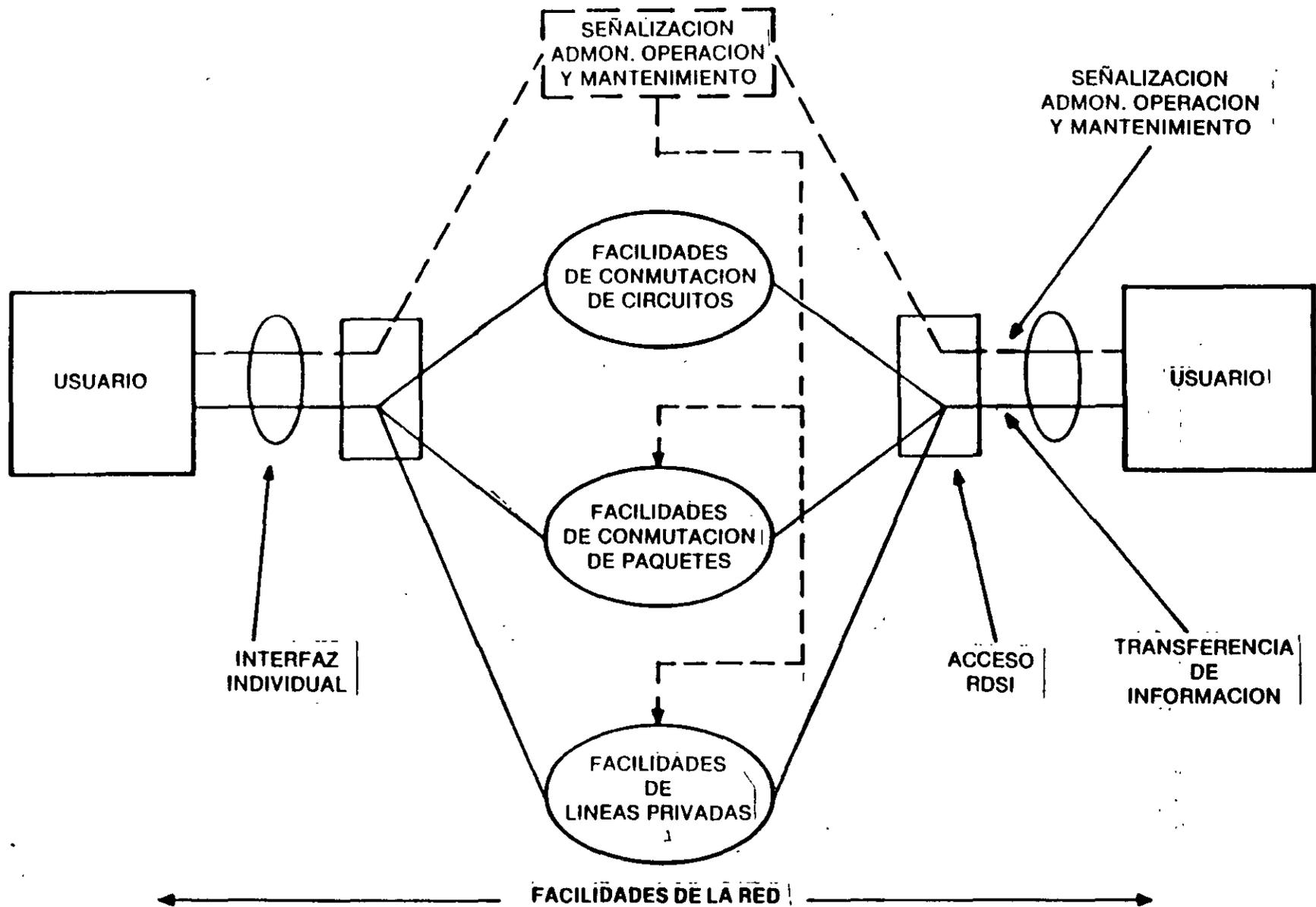




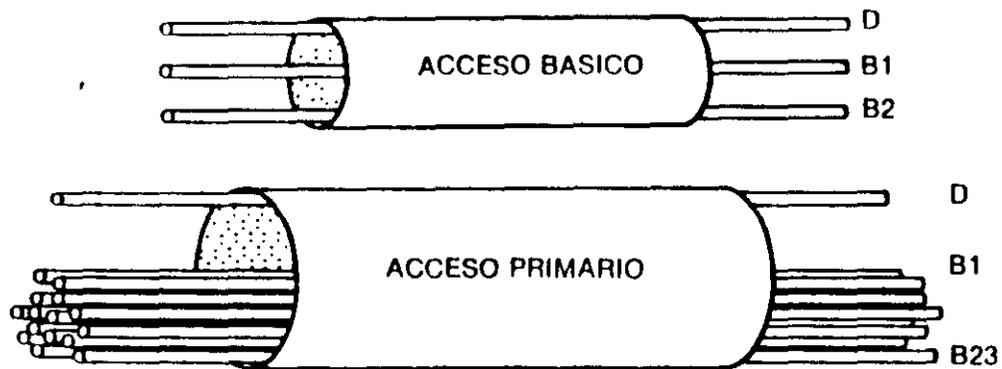
MAPA COSTO-SERVICIO



INTERFACES DE LA RDSI CON LOS DIVERSOS USUARIOS DE LA RED

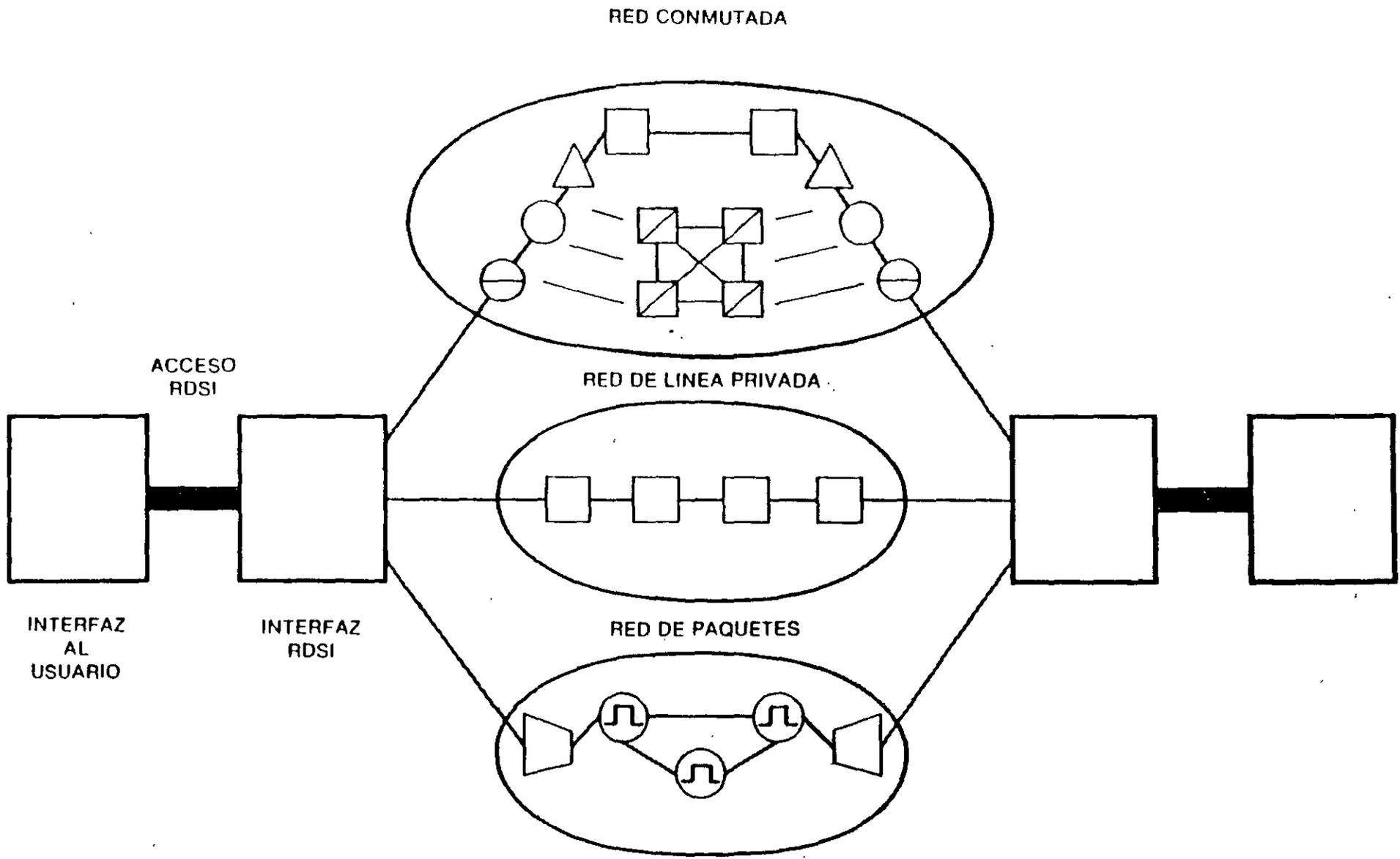


ARQUITECTURA BASICA DE LA RDSI

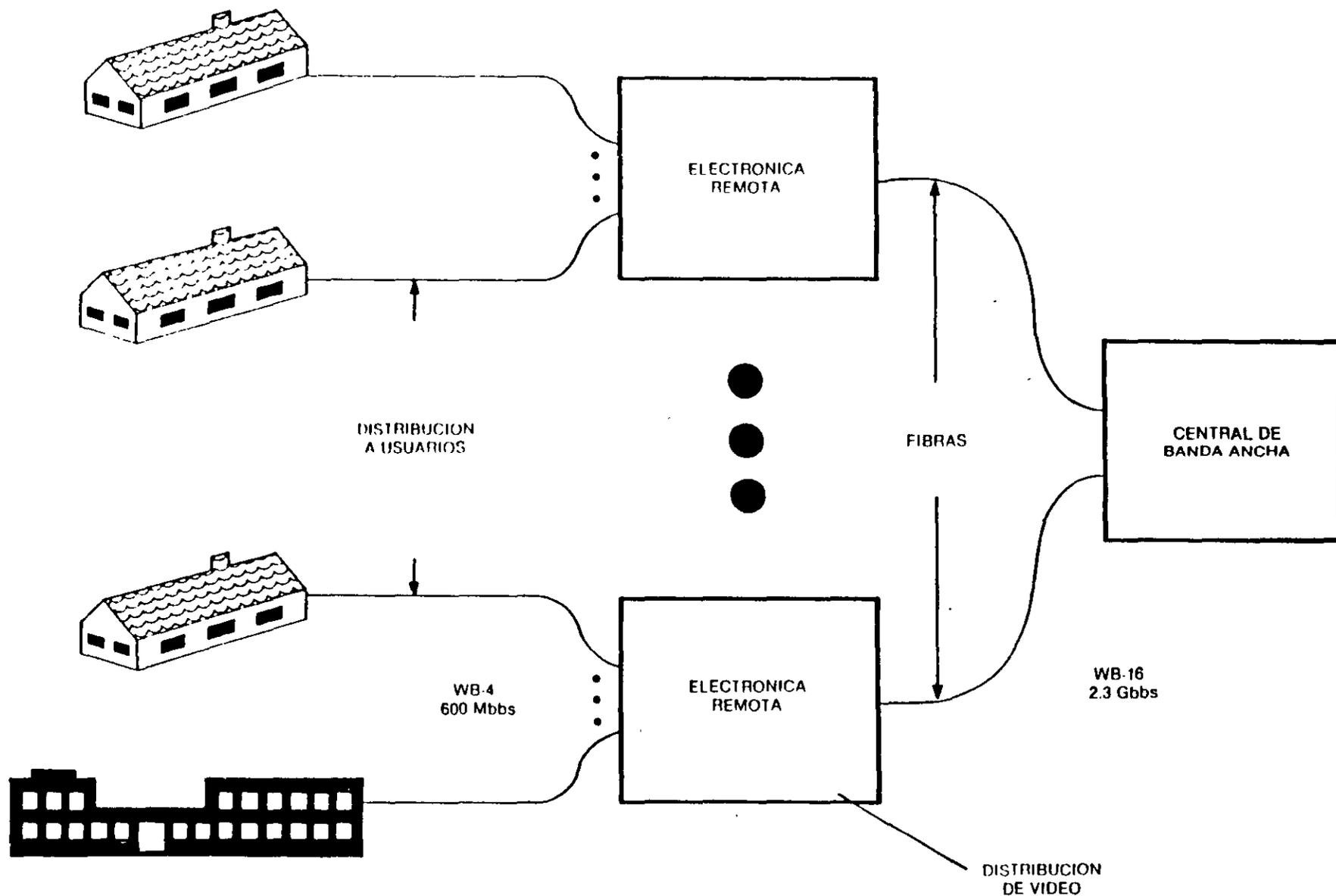


Canal "D": Señalización + Paquete de Datos
Canal "B": Acceso Digital a 64 kb/s

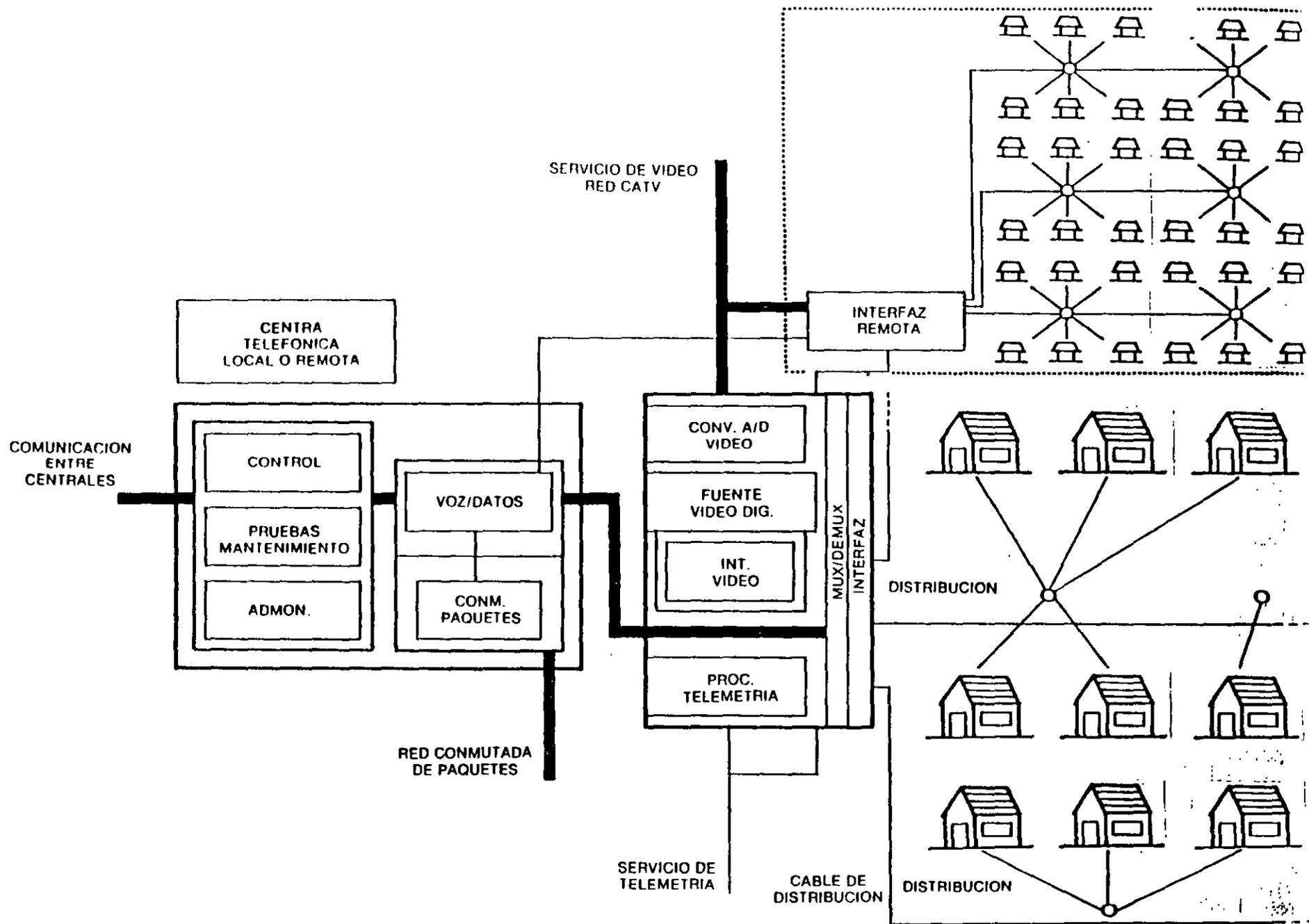
INTERFACES PARA RDSI: ACCESO BASICO Y ACCESO PRIMARIO



CONCEPTO DE RED DIGITAL DE SERVICIOS INTEGRADOS (RDSI)



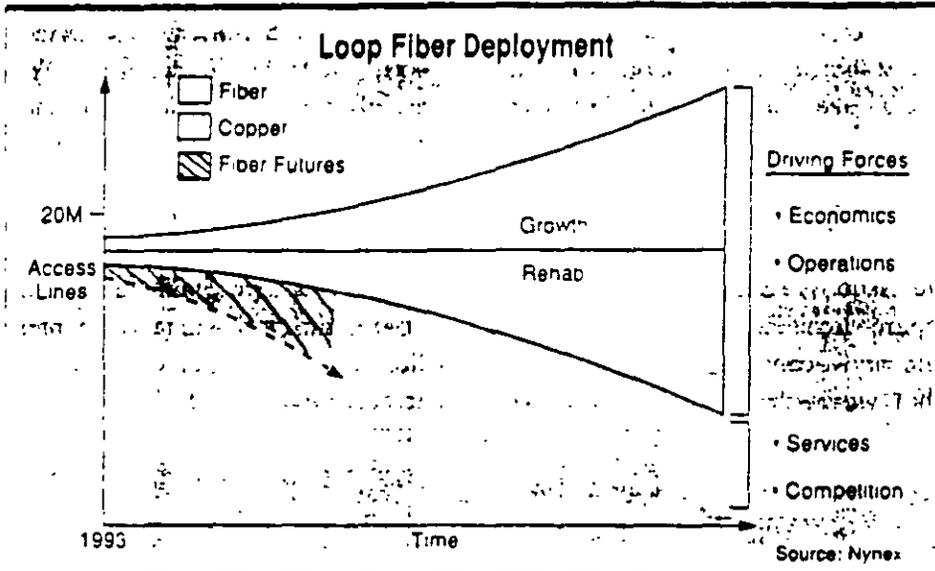
ACCESO LOCAL DE BANDA ANCHA A PARQUES INDUSTRIALES



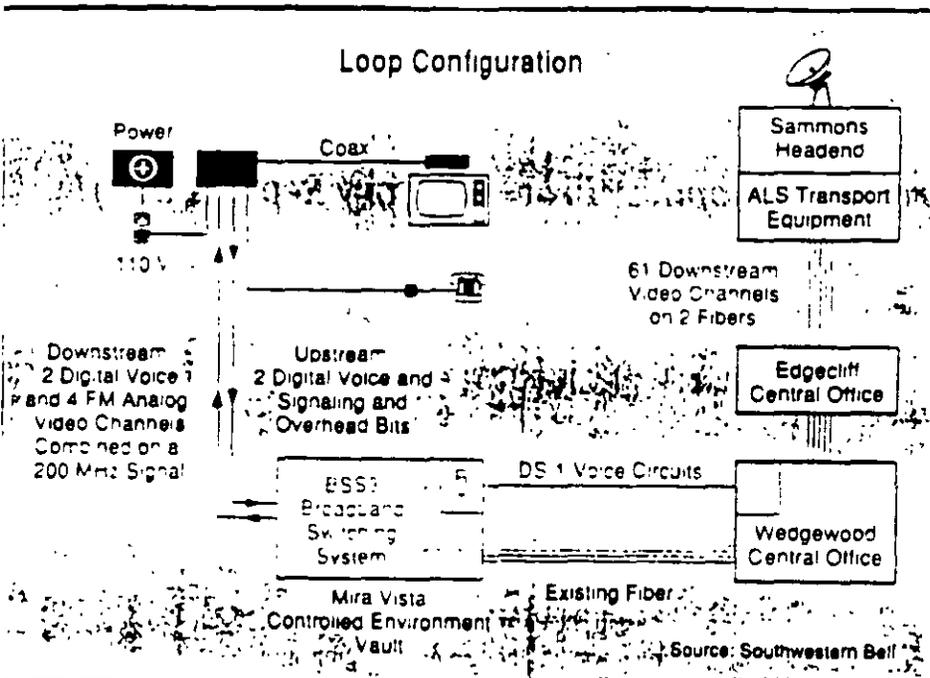
RED INTEGRADA TIPO ESTRELLA DOBLE



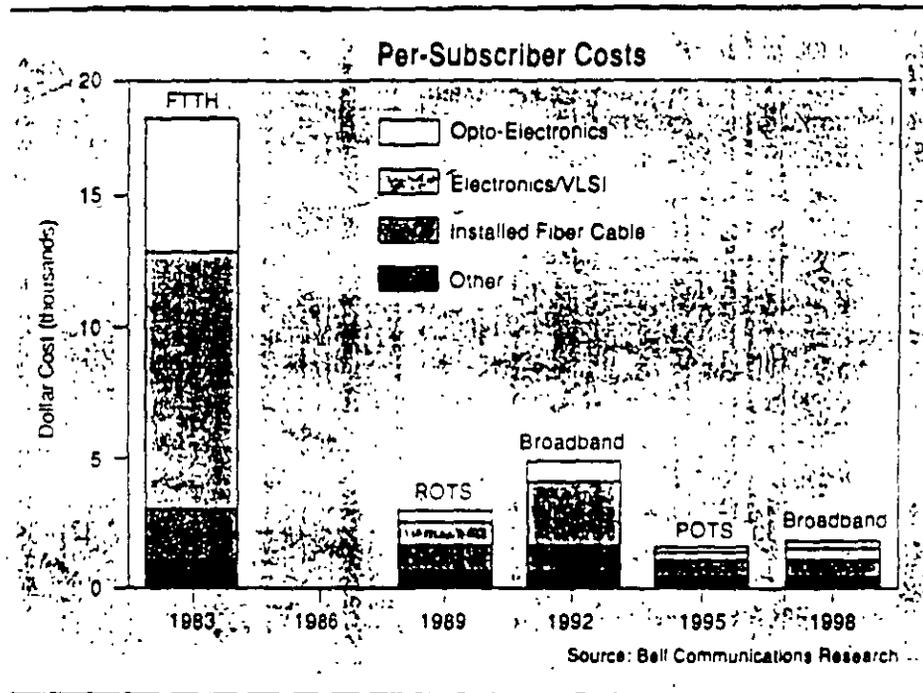
SPECIAL REPORT



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, Texas, 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.

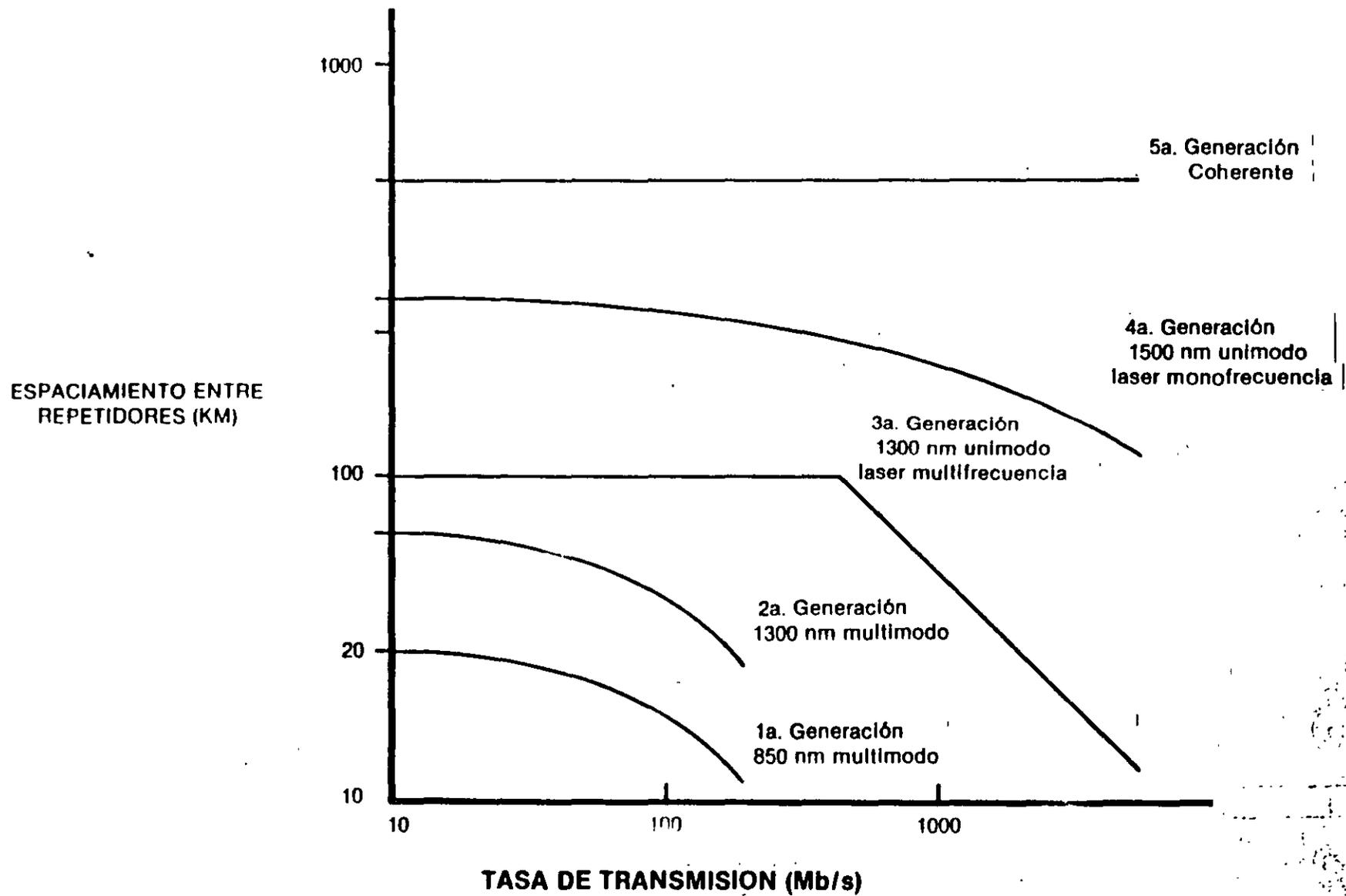
FIBER-TO-THE-HOME TRIALS

Holding company	Operating company	Developer	Cable television company	Timeline	Location	Number of residences	Switch	Electronic supplier	Transmission system/equipment	Demultiplex 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	Greater Southern Development Inc.	Munter'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	Riveridge, 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	Some 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 SLIC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	4th quarter 1989	Lakeview Terrace, Charleston, S.C.	100	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLIC	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 SLIC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	Began 8/89	Munter's Creek II, Orlando, Fla.	117	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLIC	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
BellSouth	Southern Bell		POTS only	8/89	Coco Plum, Miami, Fla.	45 initially, 300 eventually	AT&T 5-ESS	AT&T	AT&T Series 5 SLIC	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 SLIC	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 SLIC	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 "pubcon video"		Amer. Light Sys.		Analog video digital POTS	36 video channels and POTS over fiber optic network; hybrid video/voice/data over singlemode fiber	
				2nd quarter '90	Cerritos, Calif.			GTE Labs		Digital	1 singlemode fiber	

GTE Co	General Telephone of California	Existing community	POTS	1989	Carroll, Calif.	Existing	GTE 2EAX	Analog	Twisted pair			
GTE Corp.	General Telephone of California	Existing community	Apollo Cablevision is leasing bandwidth	Main Street and pay-per-view 2nd quarter 1990	Carroll, Calif.	250-300 targeted now, potentially 16,000	GTE Services Corp.	Digital	Coaxial 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	Feder 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	Pahob	Hefcon	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, Okla., 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		Sannan CATV	4th quarter 1989	Mesa 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 Cleeve, U.K.	128 customers	BT	BT	BT passive WDM (TPON)	Singlemode digital	1 singlemode fiber	
British Telecom	British Telecom			Start 9/90	Bishops Cleeve, 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 Cleeve, 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 Cleeve, 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.
Nynex	Raynet		POTS only	1989	Lynnfield, Mass.	100				85/125-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 Mbps 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 Mbps es conocida como ArcNet Plus y es totalmente compatible con la de 2.5 Mbps.

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 cable-anillo a 100 Mbps 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 trancceptores 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 accedados 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.

4.- 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.

5.- 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 espaciamento 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 mas 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**

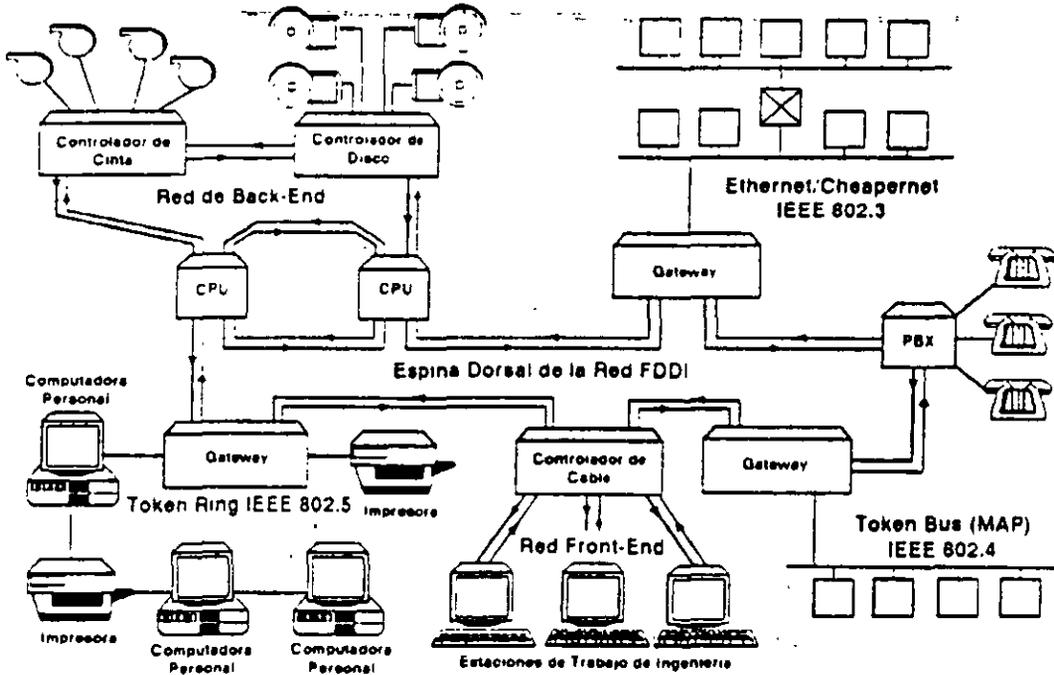
**RED ANILLO TOKEN- PASSING 100 Mb/S
CON REDUNDANCIA. (ANSI - X3T9)**

**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)

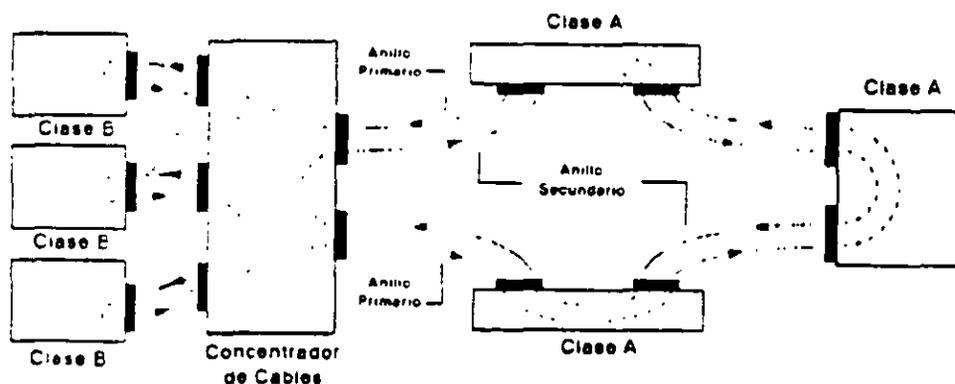
B) FIBRA TIPO MULTIMODO. FIBRAS CON NUCLEO 50-62.5 MICRAS Y MEDIANAS DISTANCIAS (10 - 20 KM) A 1300 NANOMETROS.

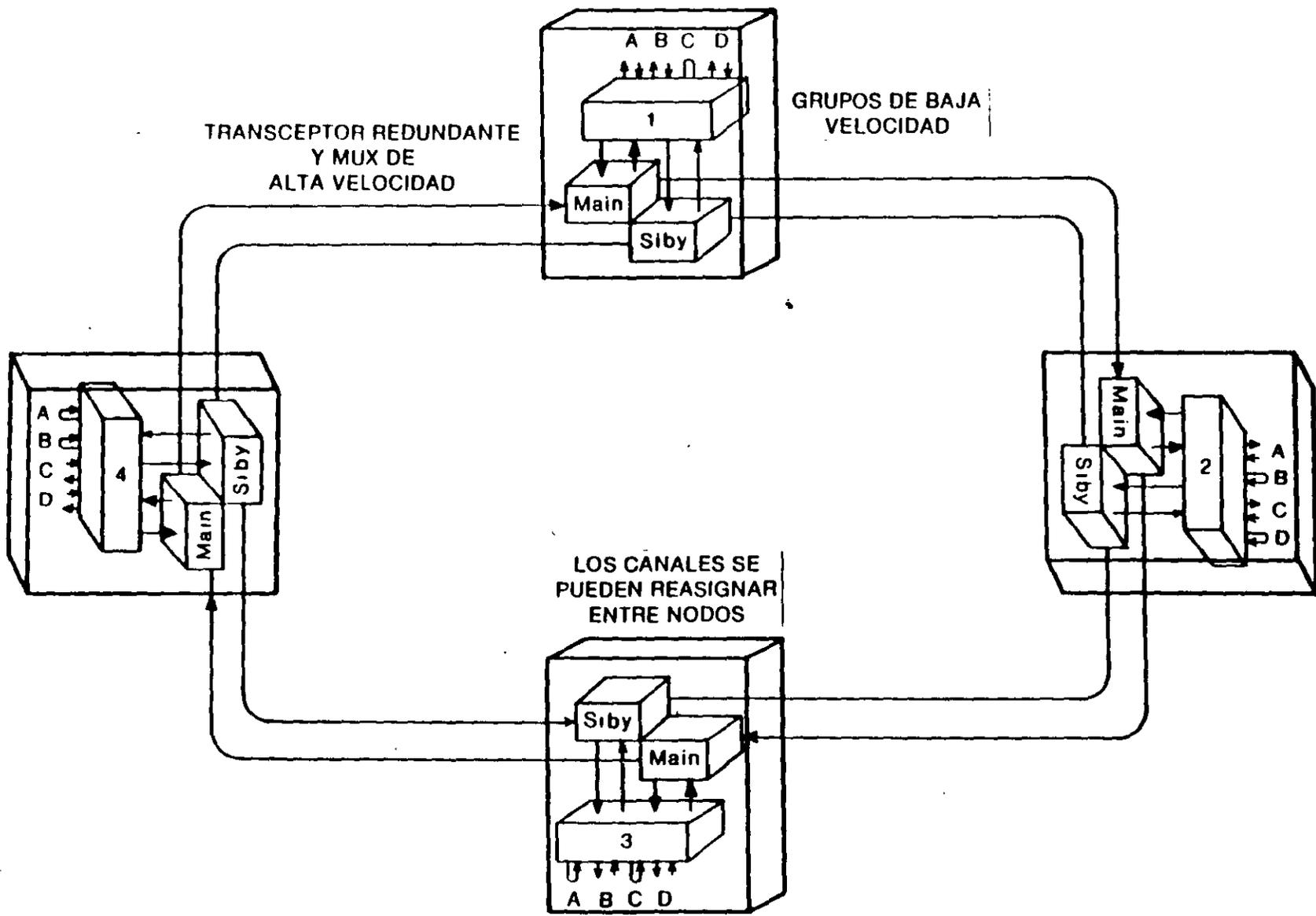
ESTACIONES:

TIPO CLASE A : SE CONECTA DIRECTAMENTE AL ANILLO DOBLE.

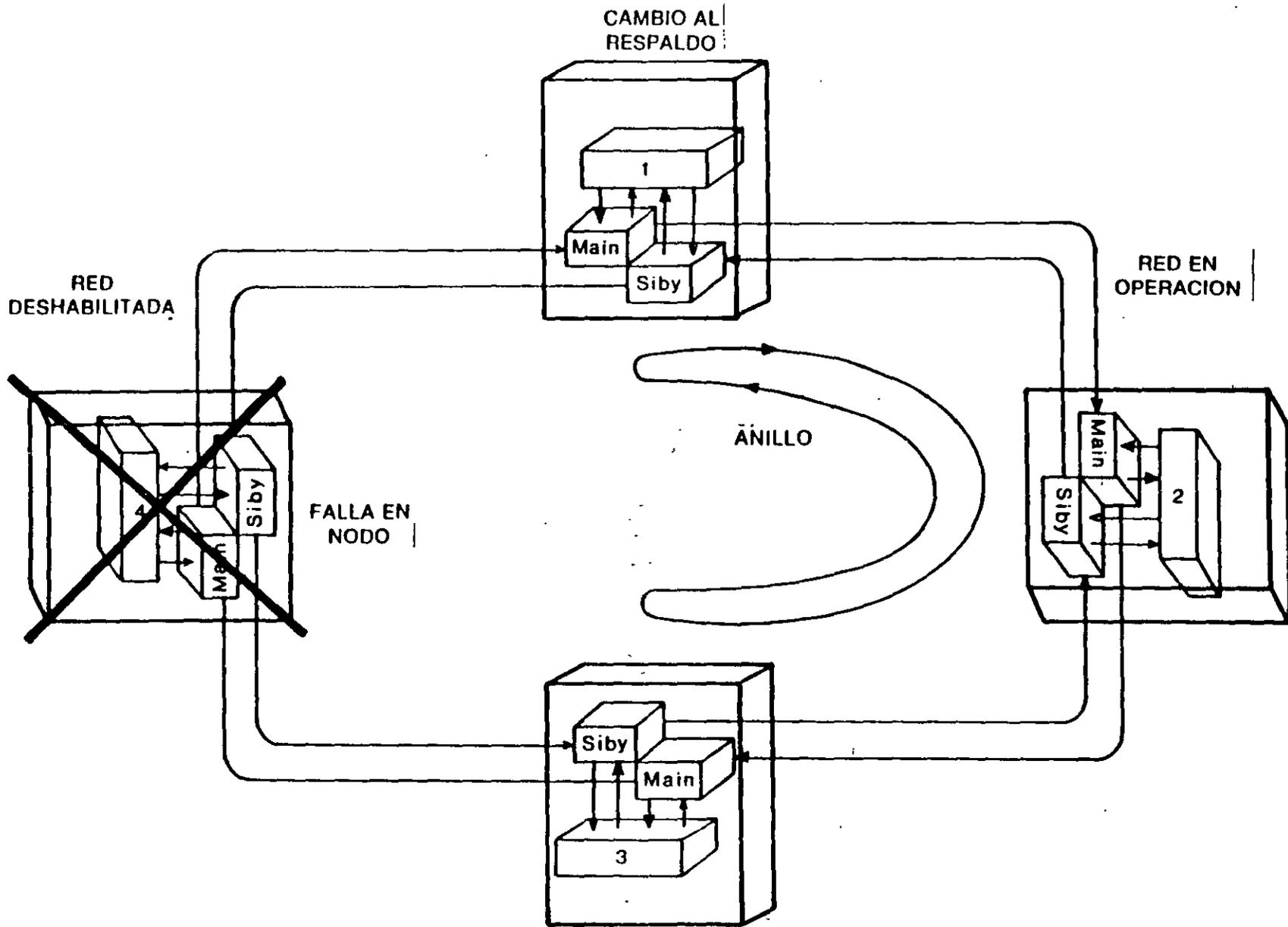
TIPO CLASE B: SE CONECTAN AL CONCENTRADOR DE PUERTOS MULTIPLES EN RED ESTRELLA O ESTACIONES CON POSIBILIDAD DE CONEXION SENCILLA. LOS CONCENTRADORES PUEDEN SER CONECTADOS EN CASCADA.

EJEMPLO DE ANILLO FDDI

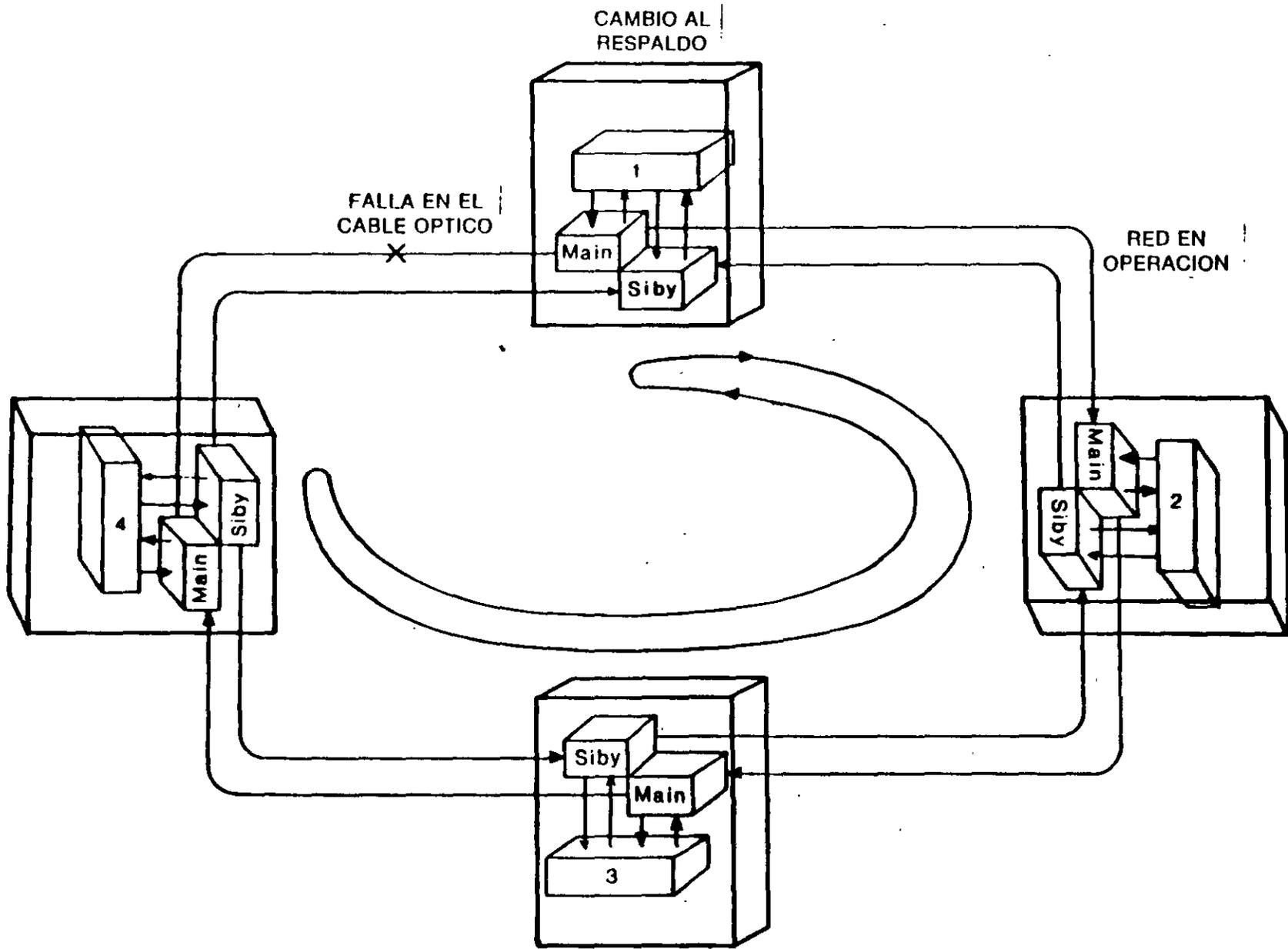




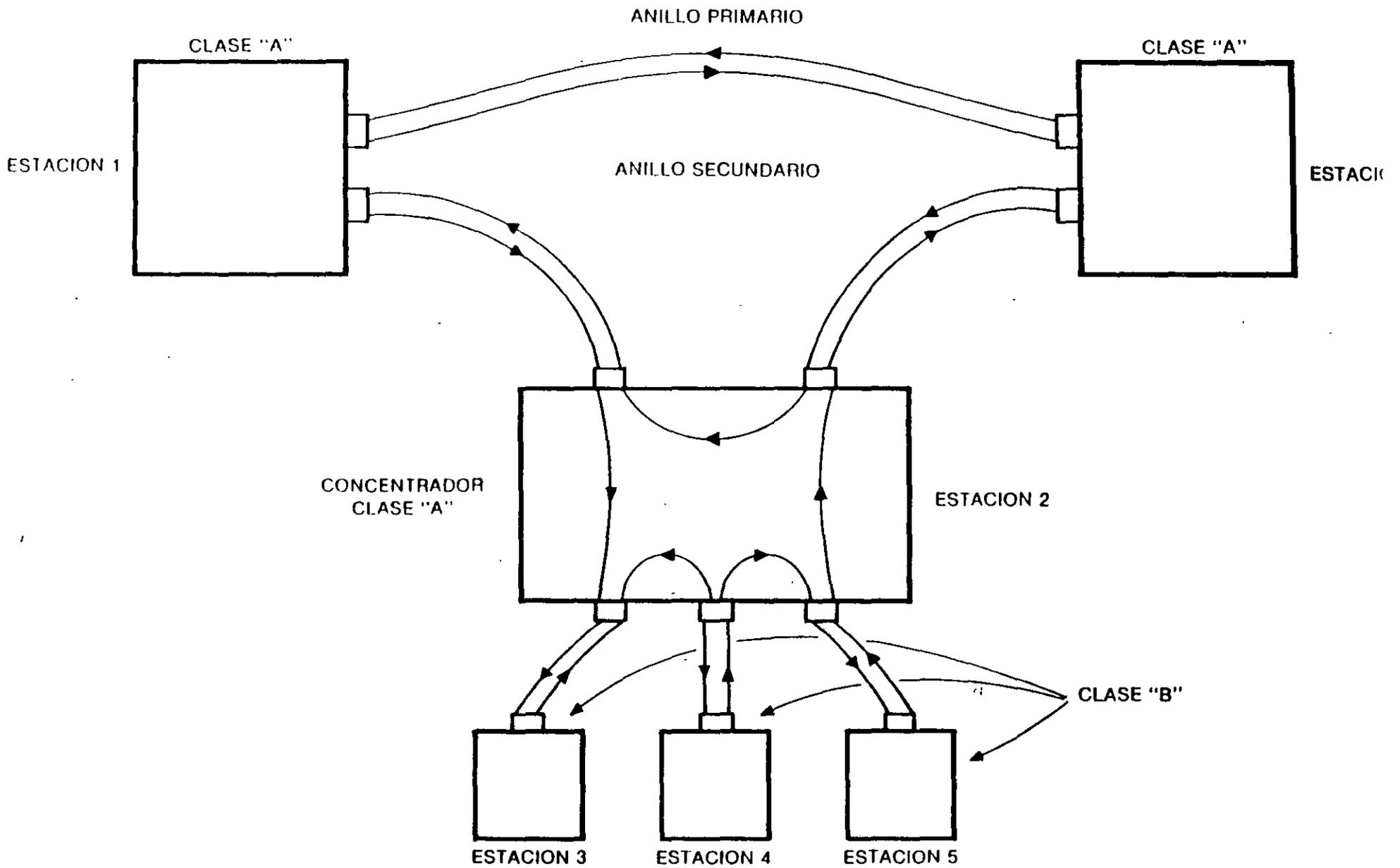
RED ANILLO DE BANDA ANCHA CON FIBRA ÓPTICA



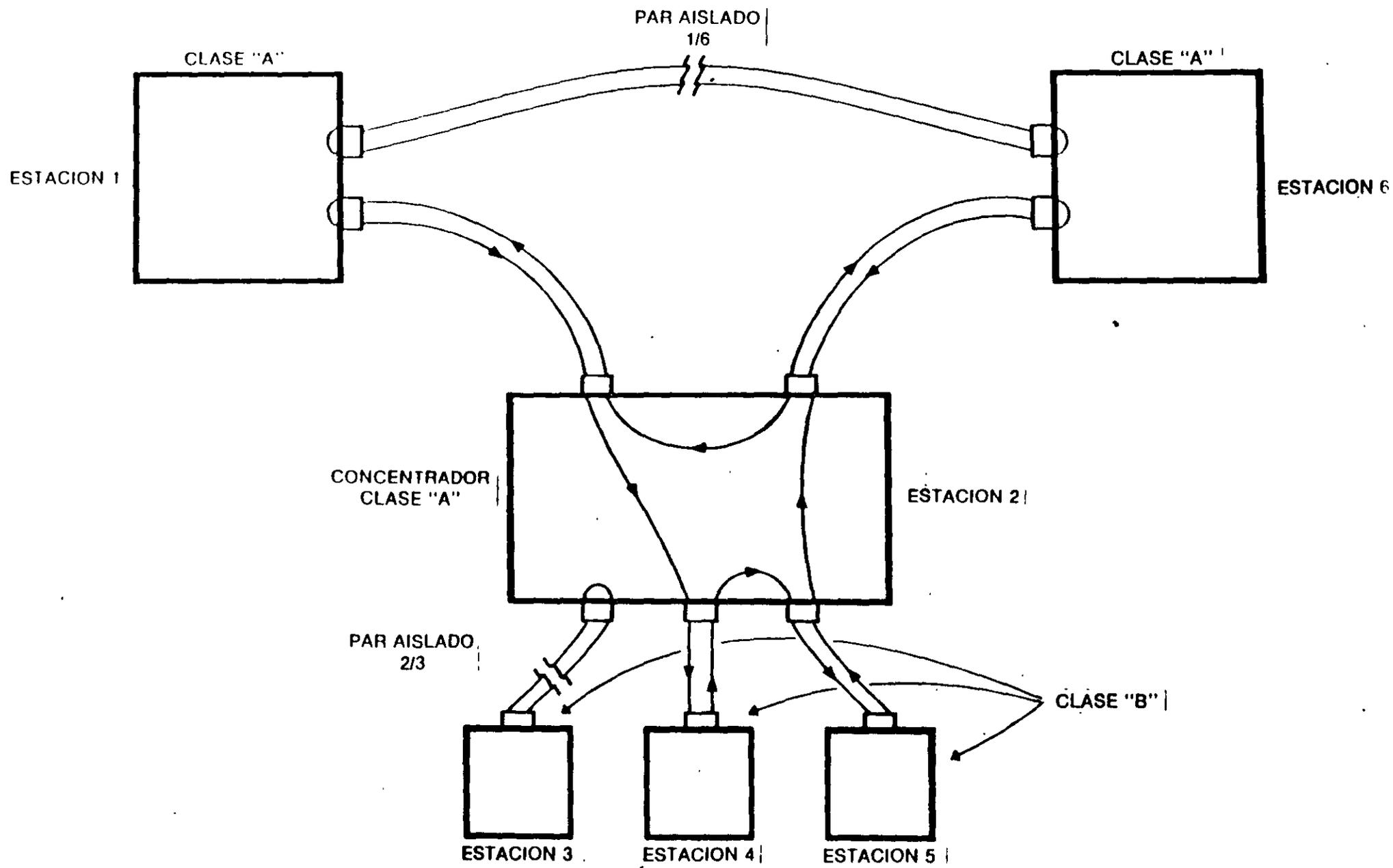
FALLA DE NODO EN LA RED ANILLO



FALLA DE CABLE OPTICO EN LA RED ANILLO |

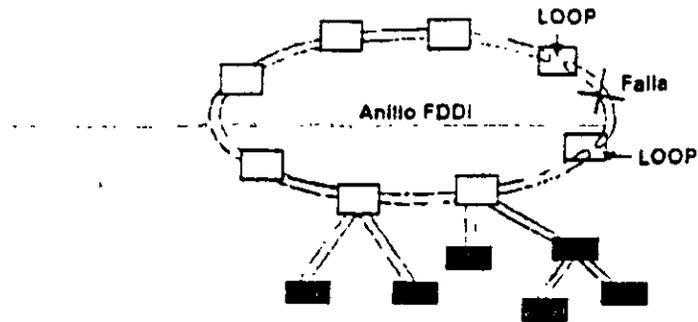


TOPOLOGIA ANILLO FDDI

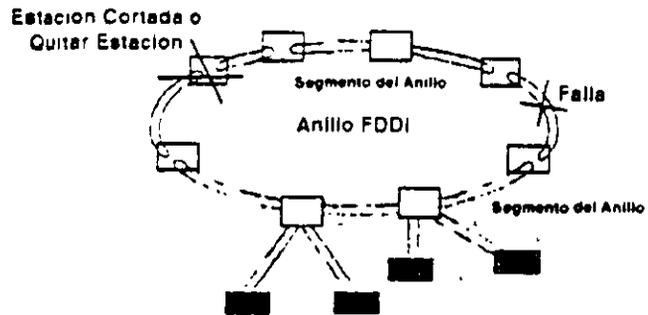


ANILLO FDDI RECONFIGURADO

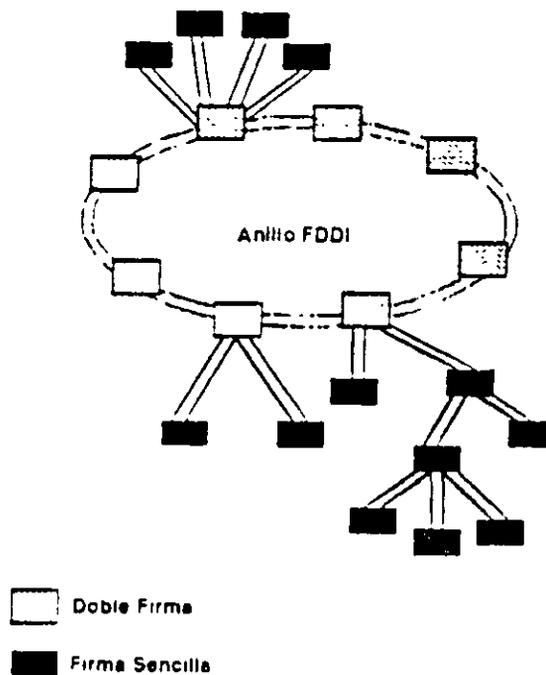
UNA FALLA



FALLAS MÚLTIPLES



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.

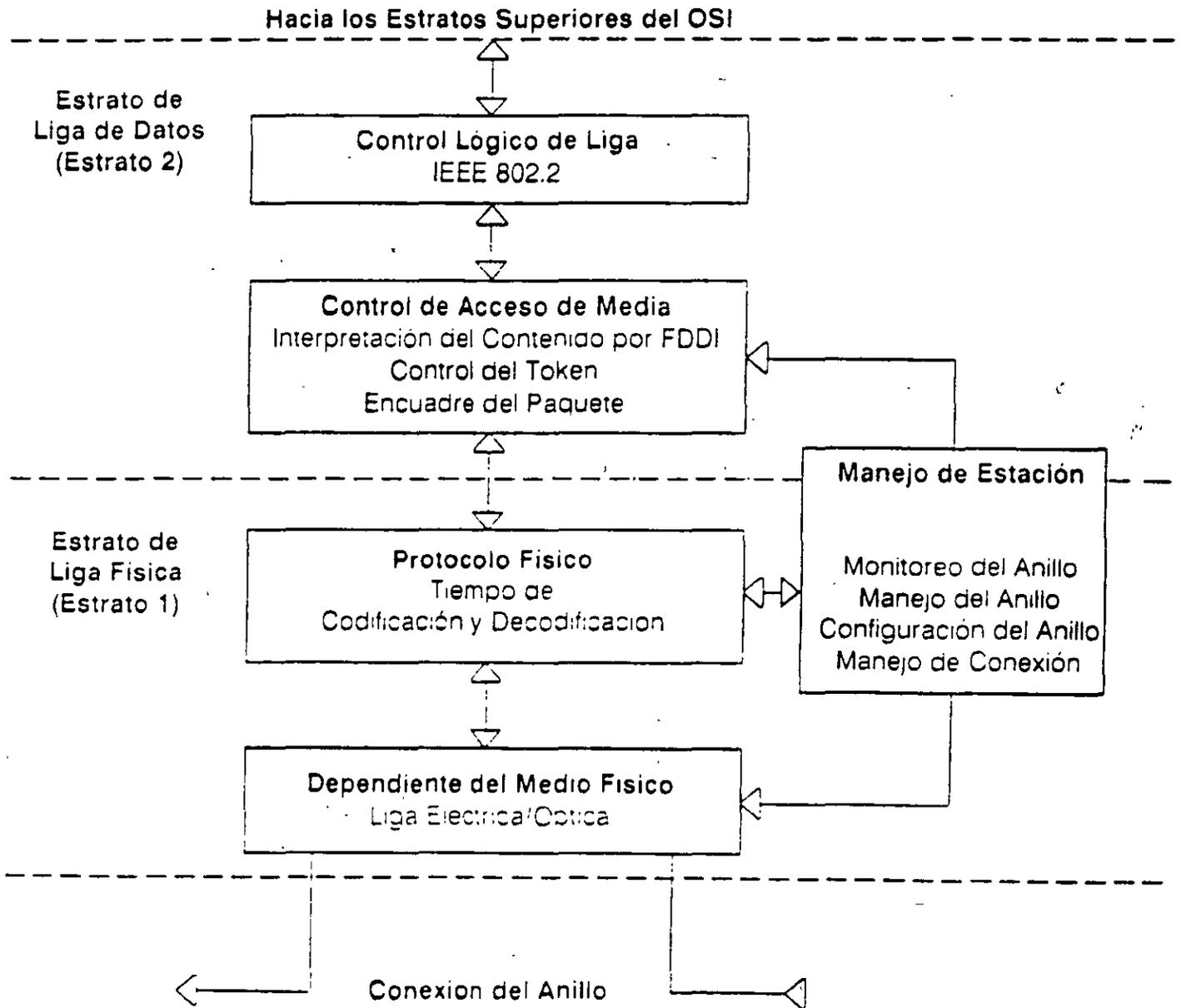
FDDI EMPLEA UNA CODIFICACION 4B/5B. TASAS DE TRANSMISION A 100 Mb/S - 125 MHz. 80% DE EFICIENCIA EN EL ANCHO DE BANDA.

ETHERNET Y TOKEN-RING EMPLEAN UNA CODIFICACION MANCHESTER

TASA		
DE TRANSMISION -	ETHERNET:	10 Mb/S - 20 MHz
	TOKEN-RING:	16 Mb/S - 32 MHz

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.

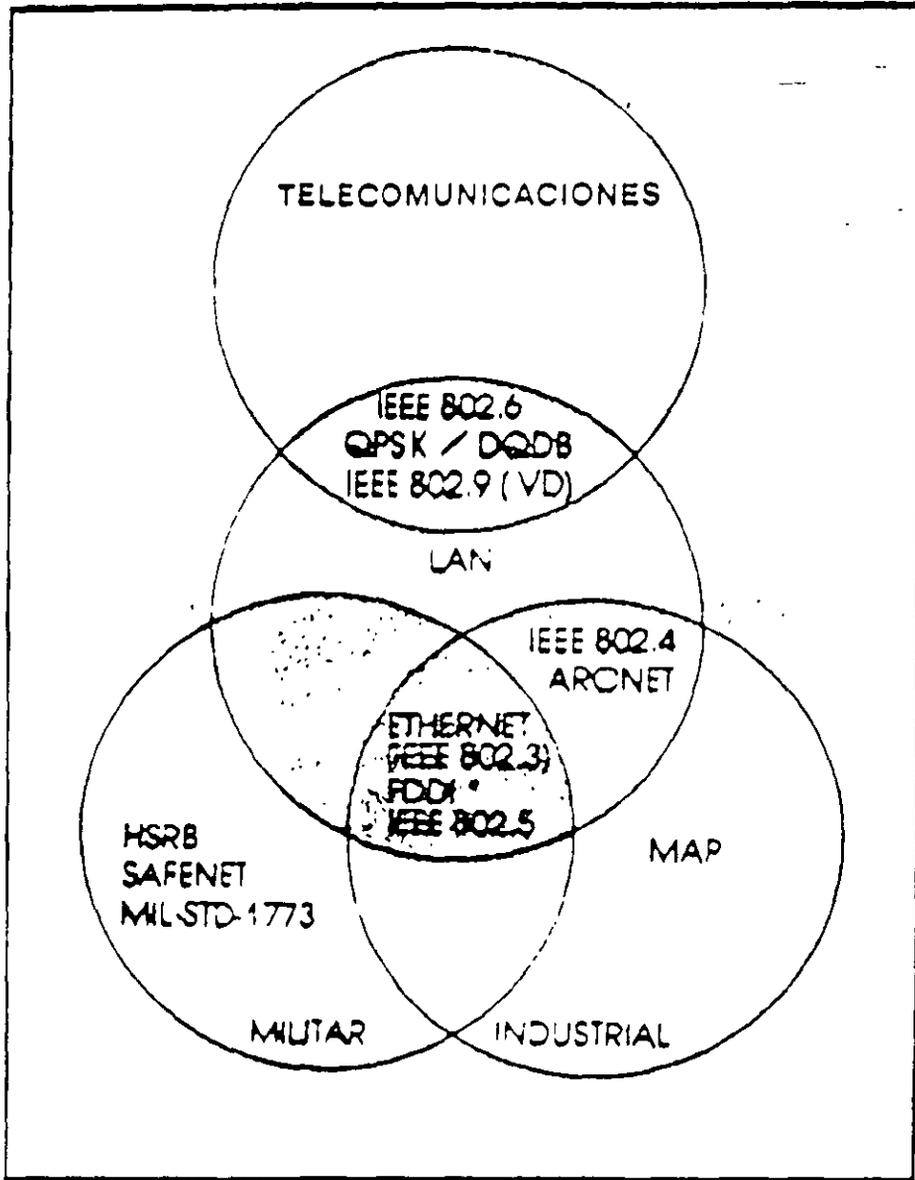
**ROTACION DEL
"TOKEN".**

**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

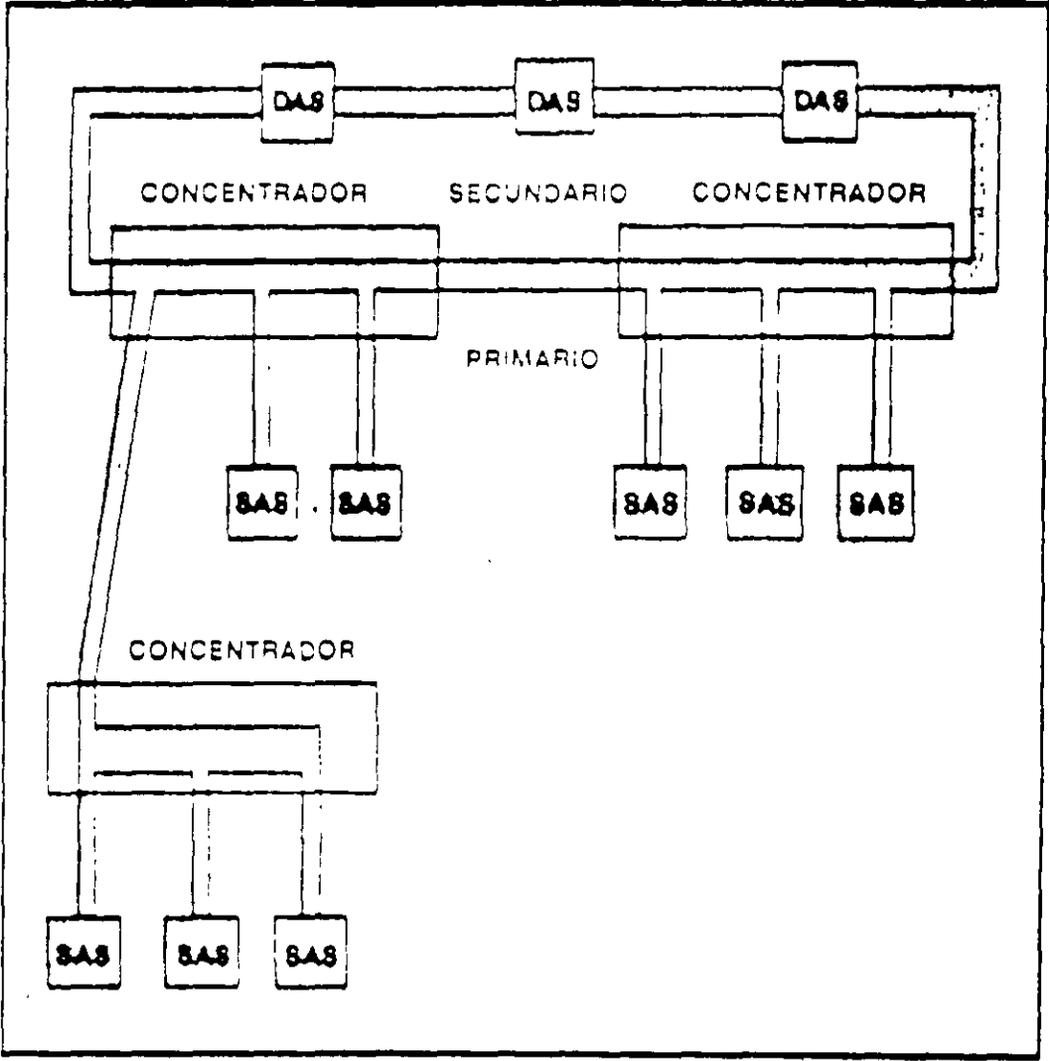
	COSTO DECRECIENTE				INCREMENTO EN LA SEGURIDAD		DISEÑO SIMPLE		CALIDAD DE INFORMACION	
	EQUIPO INSTALACION	INSTALACION INSTALACION	MANEJO MANTENIMIENTO CONTINUO	POSIBILIDAD DE EXPANSION	PERSONAL	EQUIPOS	SISTEMA DE COMUNICACIONES	PLANTA	ESTABILIDAD	SEGURIDAD
1. PROPIEDADES										
ELECTROMAGNETICAS										
INMUNIDAD A RUIDO										
ELECTROMAGNETICO							•	•	•	
NO EXISTE FALSIACION										
ELECTROMAGNETICA							•	•		•
NO CONEXION A ELECTRICIDAD		•	•		•	•		•		
NO EXISTE PROBLEMA DE INTERFERENCIA			•		•	•		•		
NO EXISTE PROBLEMA DE INTERFERENCIA		•	•				•	•		
NO EXISTE FALSIACION										
2. CARACTERISTICAS FISICAS										
ESPAZIO REDUCIDO Y BAJA CONSUMO DE ENERGIA		•						•		
CONVIVENCIA CON CABLES DE ENERGIA		•	•					•		
CONVIVENCIA CON EQUIPOS EXPLOSIVOS		•	•		•			•		
3. CAPACIDAD Y FUNCIONAMIENTO										
ATENUACION 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

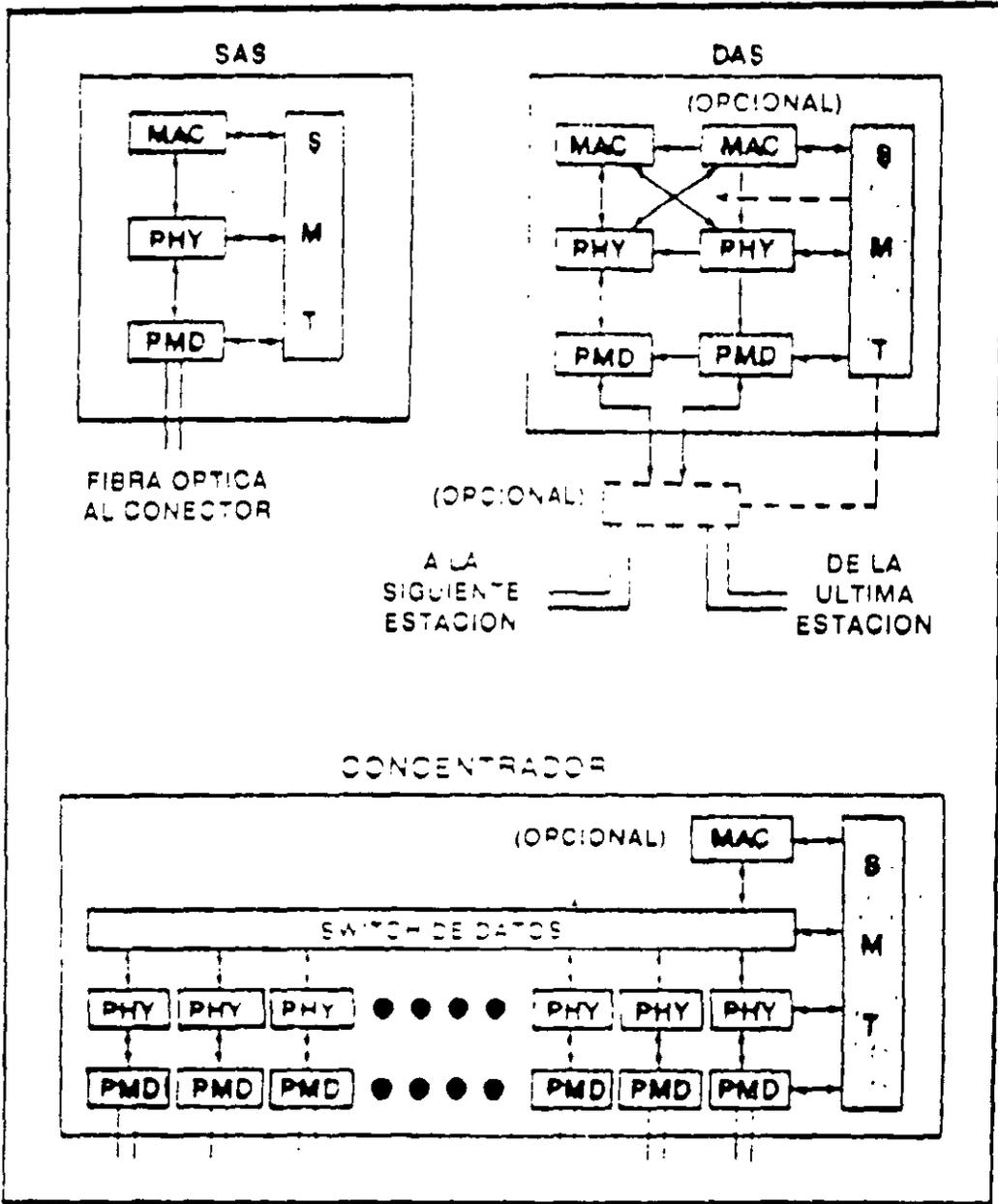
	NUCLEO	NUCLEO / REVESTIMIENTO (MICRAS)
UNIMODO	ESTANDAR (VIDRIO)	9/125
MULTIMODO	ESTANDAR (VIDRIO)	50/125
		62.5/125
		85/125
		100/140
	GRUESO (PLASTICO)	200/250 1000/1040

TABLA 3
CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DE LA RED
CON FIBRAS OPTICAS

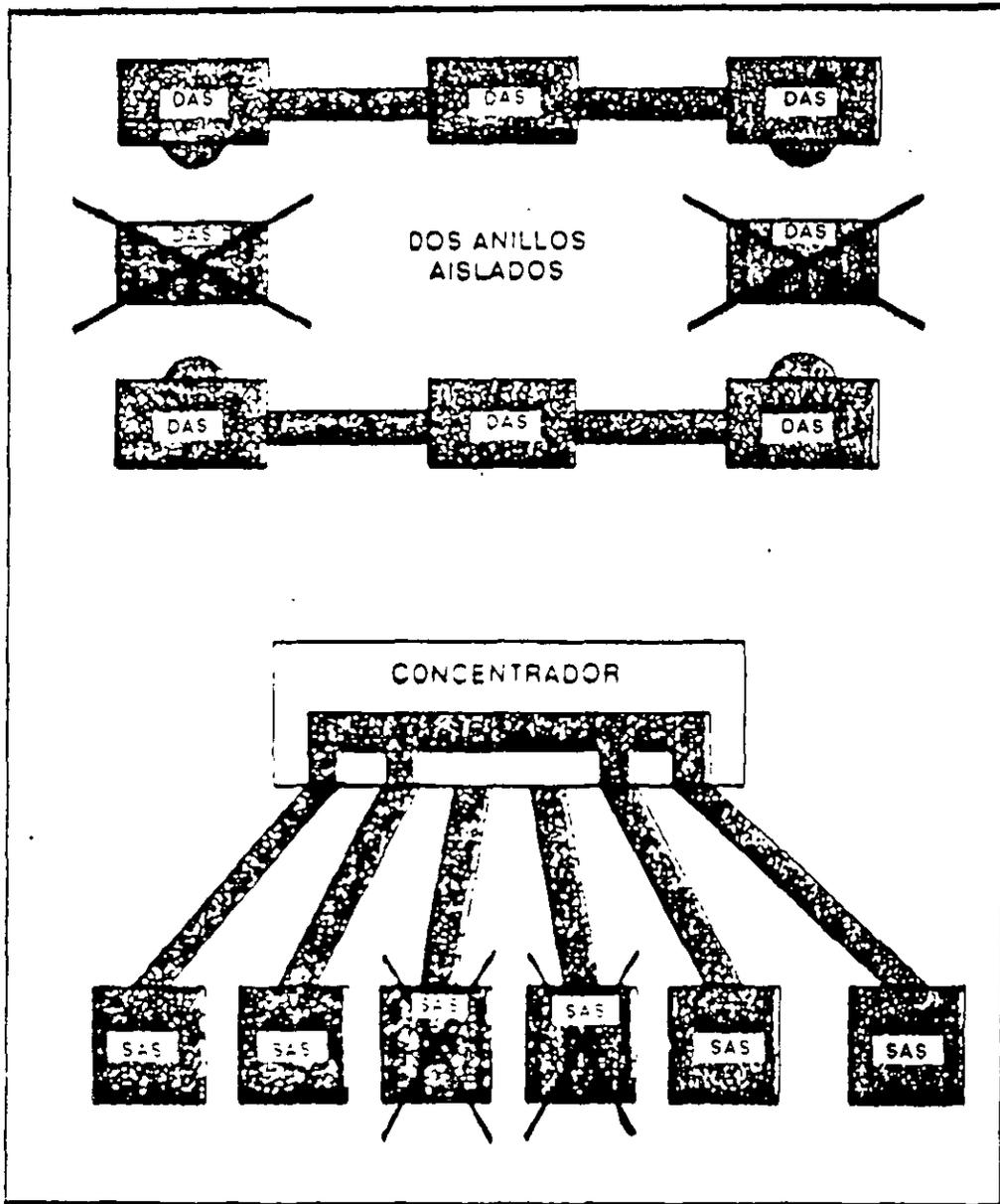
FUENTES		DETECTORES		FIBRAS	
LED	LASER	PIN	APD	NUCLEO GRUESO	NUCLEO DELGADO
COSTO REDUCIDO	MAYOR ANCHO DE BANDA	COSTO REDUCIDO	MEJOR SENSIBILIDAD DEL DETECTOR	FACIL DE EMPALMAR Y CONECTORIZAR	MAYOR ANCHO DE BANDA
ACOPLAMIENTO SENCILLO	MAYOR ACOPLAMIENTO DE POTENCIA	ACOPLAMIENTO SENCILLO			
MAYOR TIEMPO DE VIDA		MAYOR ESTABILIDAD			
MAYOR ESTABILIDAD					

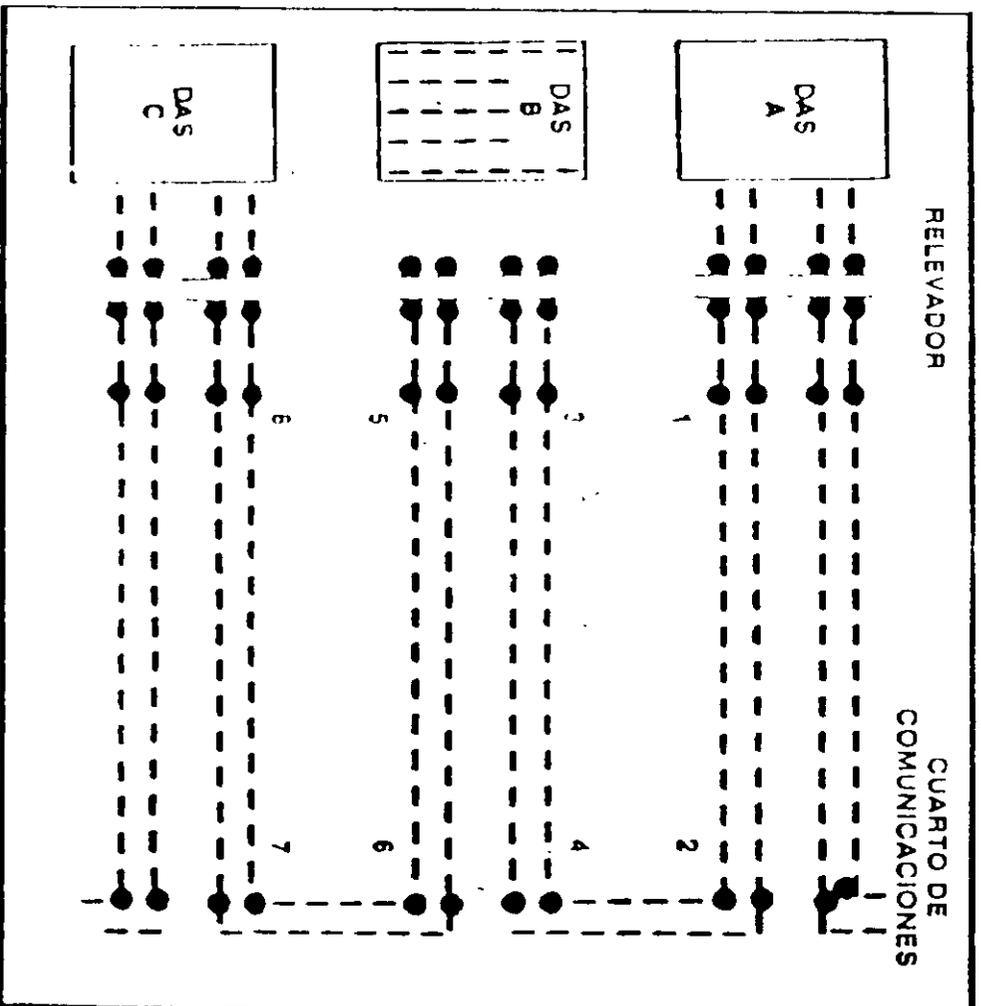


TOPOLOGIA FDDI

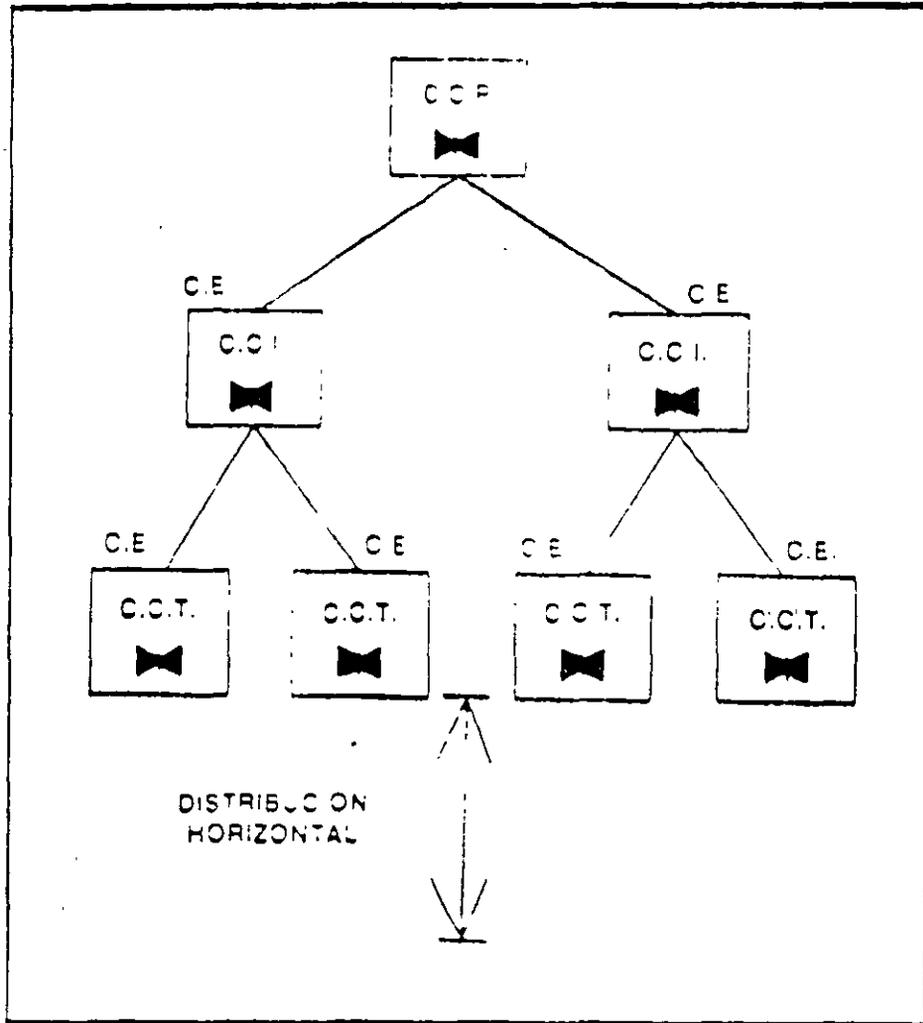


TIPOS DE ESTACIONES PARA FDDI

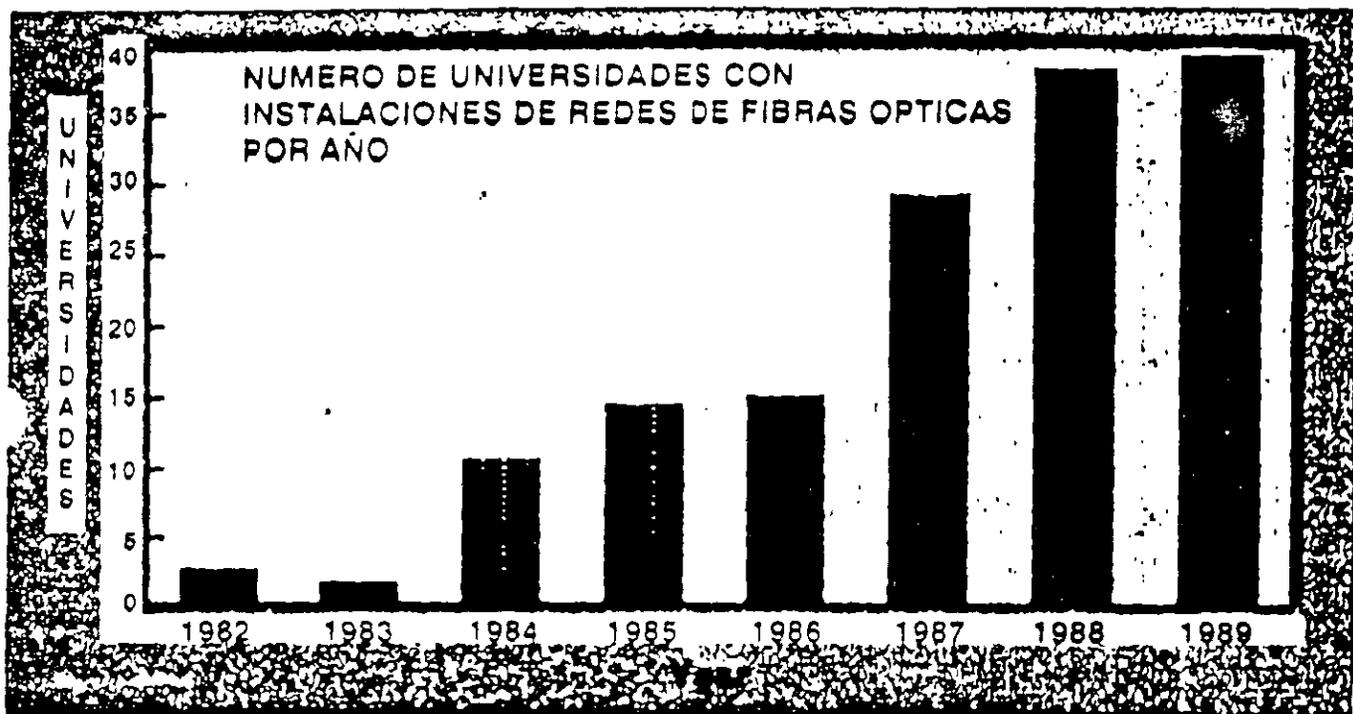




USO DE LA DERIVACION OPTICA CON
DAS EN LA ESTRUCTURA DE CABLEADO



ESTANDAR AMERICANO PARA
CABLEADO DE EDIFICIOS



EMPLEO EN LAS UNIVERSIDADES DE REDES
DE FIBRA OPTICA PARA TRANSMISION DE DATOS

CABLEADO TIPO TELEFONICO PARA LANS

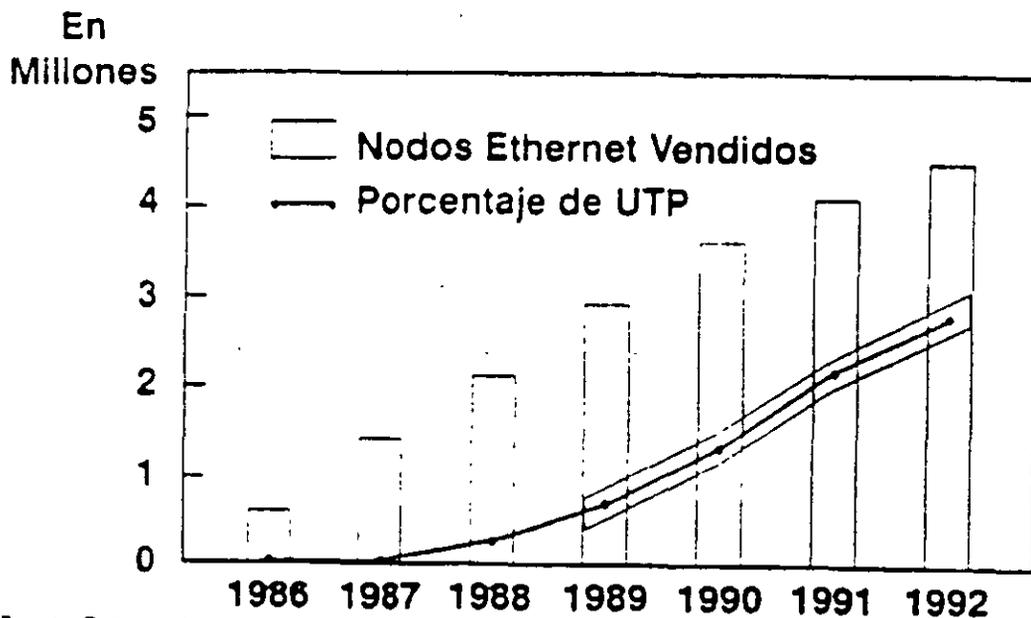
(UNSHIELDED TWISTED PAIR, UTP) A 10 MB/SEG

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



LA TECNOLOGIA UTP RESPONDE LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:

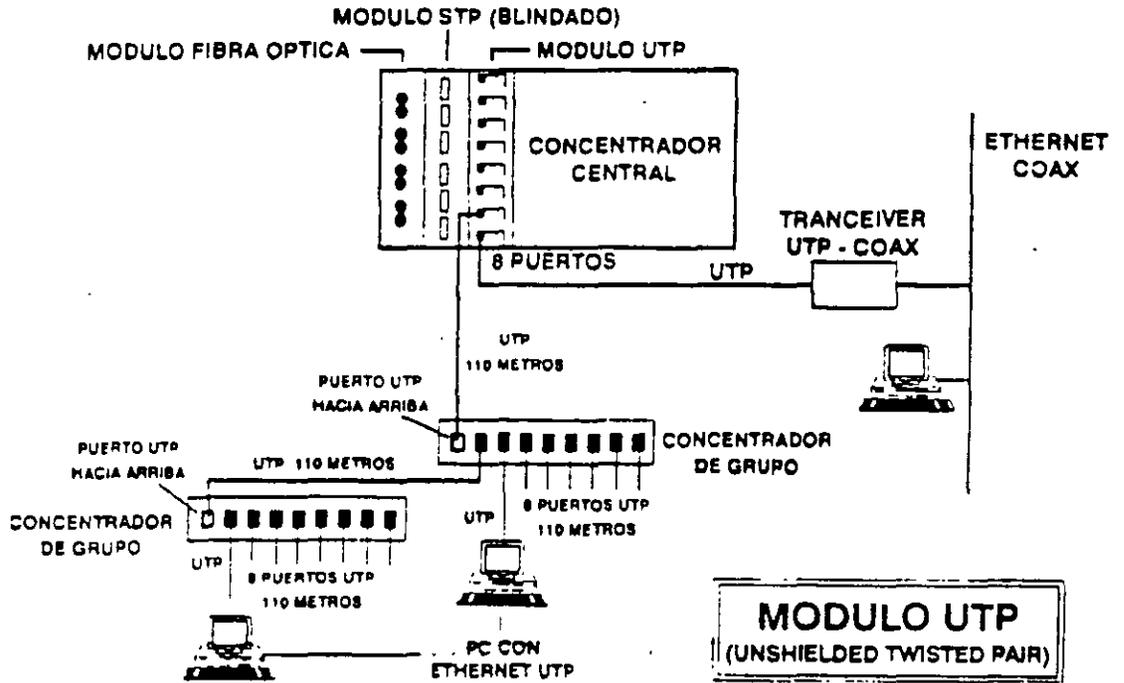
- ¿ QUE TAN CONFIABLES SON LAS REDES ACTUALES ?**
- ¿ EN CUANTO TIEMPO SE REESTABLECE UNA RED CAIDA?**
- ¿ QUE TANTA FLEXIBILIDAD SE TIENE EN ADICIONES Y MODIFICACIONES DE RED ?**
- ¿ CUANTOS DIFERENTES EQUIPOS, PROTOCOLOS Y APLICACIONES TENDRA LA RED EN LOS SIGUIENTES AÑOS ?**
- ¿ COMO SE MANTIENE UN SEGUIMIENTO DE LA OPERACION DE LOS EQUIPOS CONECTADOS EN RED ?**

LA RED COMO UTILERIA

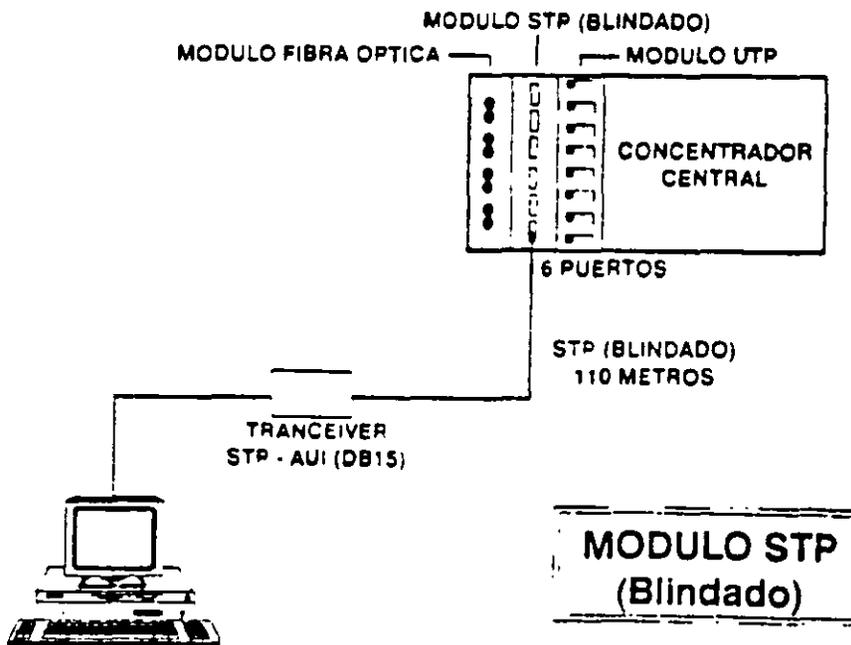
LA TECNOLOGIA UTP OFRECE

- **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**

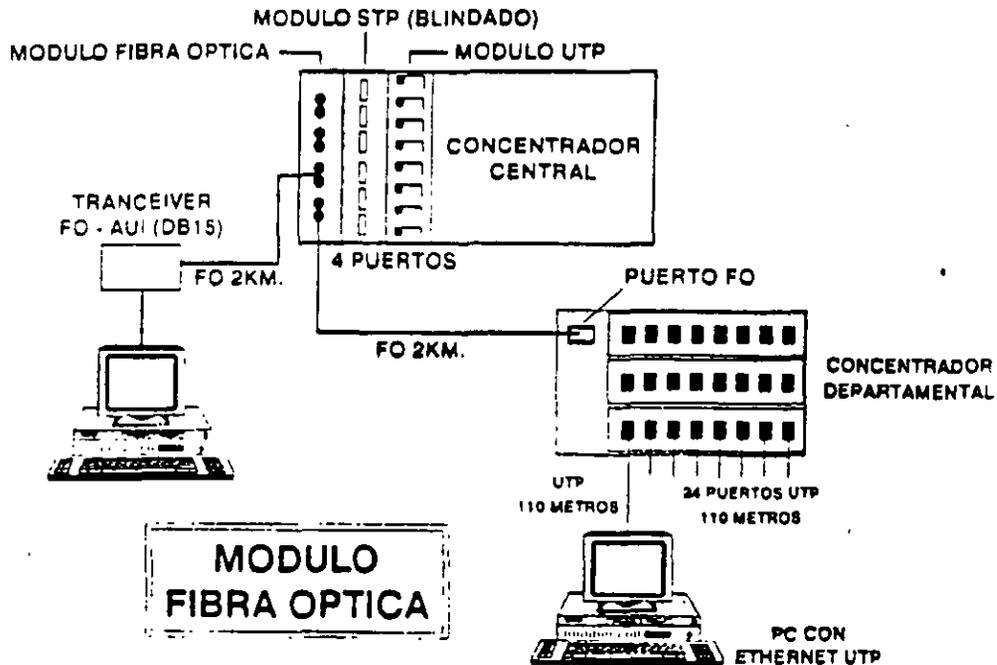
TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



TECNOLOGIA UTP LATTISNET SYNOPTICS



PRINCIPALES VENTAJAS DEL CABLEADO TELEFONICO

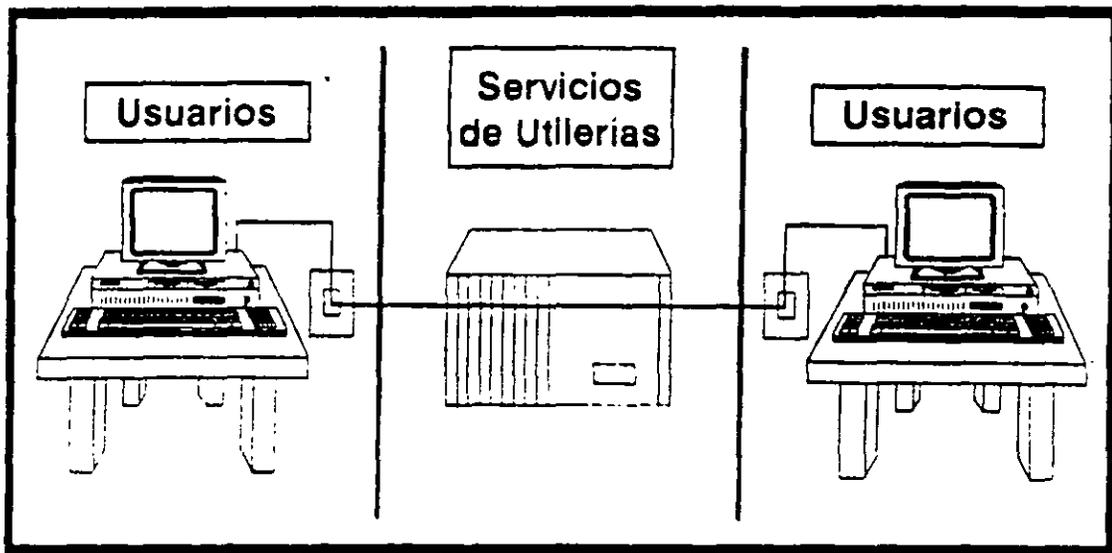
SEGURIDAD

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)

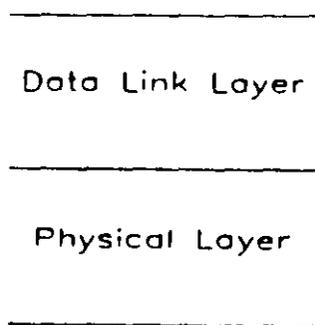


CARACTERISTICAS DEL IEEE

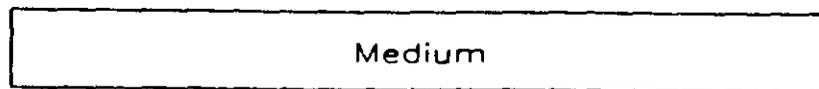
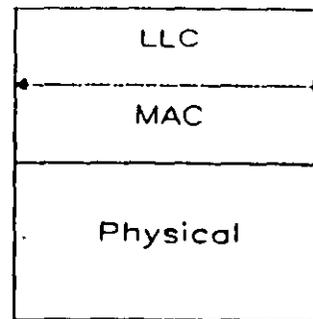
- Fundada en 1884
- La más grande organización de profesionales en ingeniería a nivel mundial.
- Gran impacto en el mercado por los trabajos de estandarización en redes locales (LAN's).
- Adicionalmente incluyen estándares en componentes electrónicos, conectores de comunicaciones y otros dispositivos afines.
- Los estándares IEEE están basados en el modelo OSI desarrollado originalmente por el CCITT y adoptado por la ISO.



ISO/OSI



IEEE 802



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).



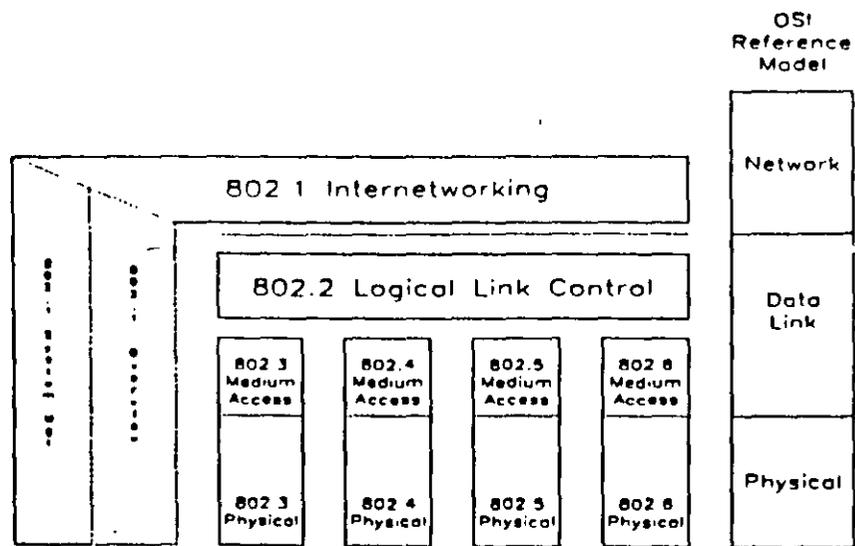
802. 4- Red de topología "BUS" con el método de acceso TOKEN PASSING (1983, Primera edición 1985).

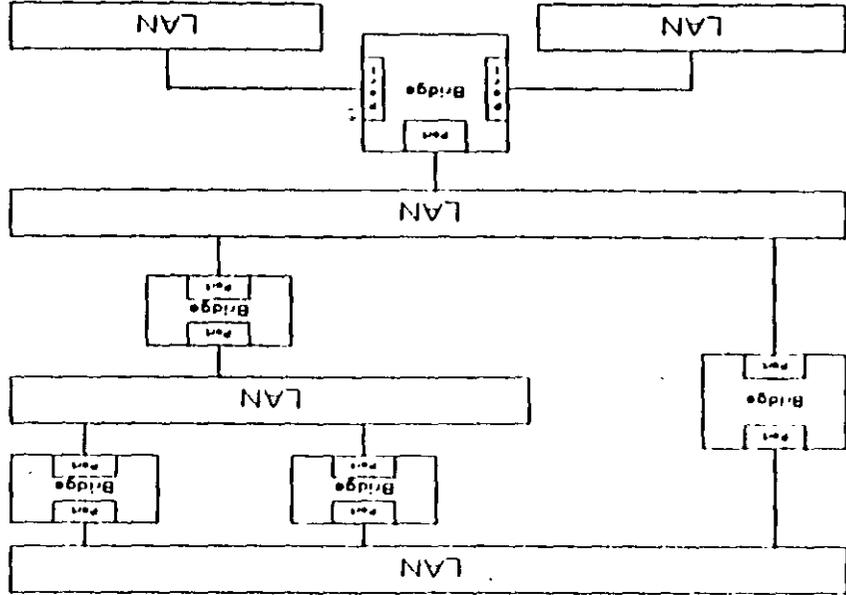
802. 5- Red de topología "ANILLO" con el método de acceso TOKEN PASSING (1969, Primera edición 1985).

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).



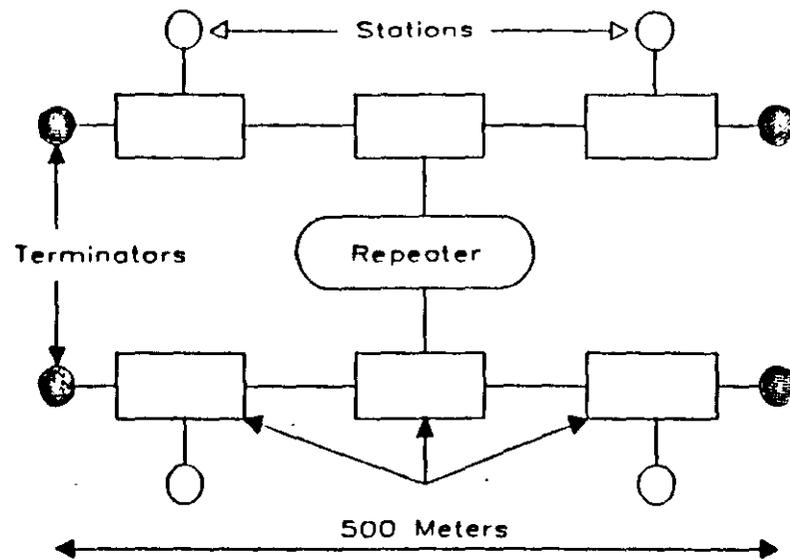




ANSI/IEEE 802.3 - CSMA/CD

- 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).





- 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).



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).

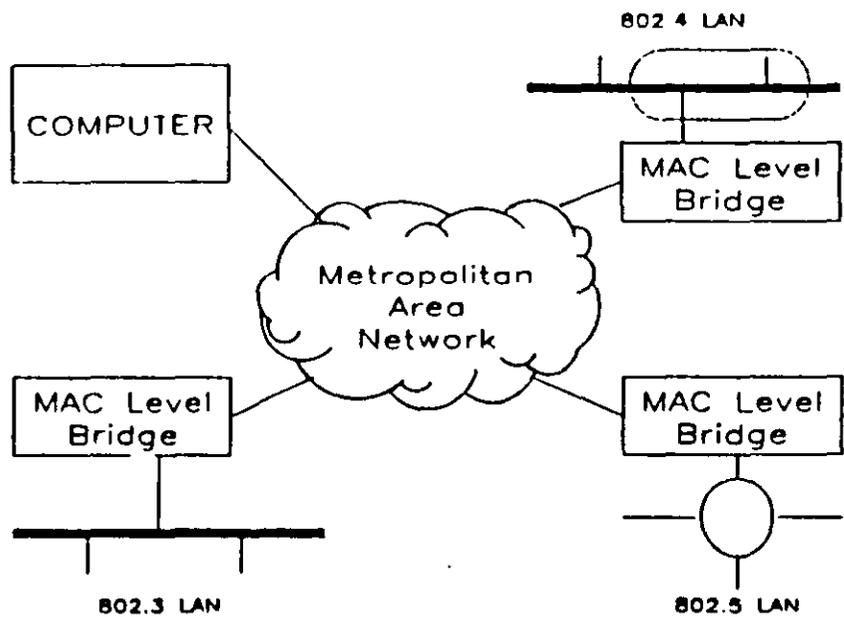
- ANSI X 3T9.5 - FDDI

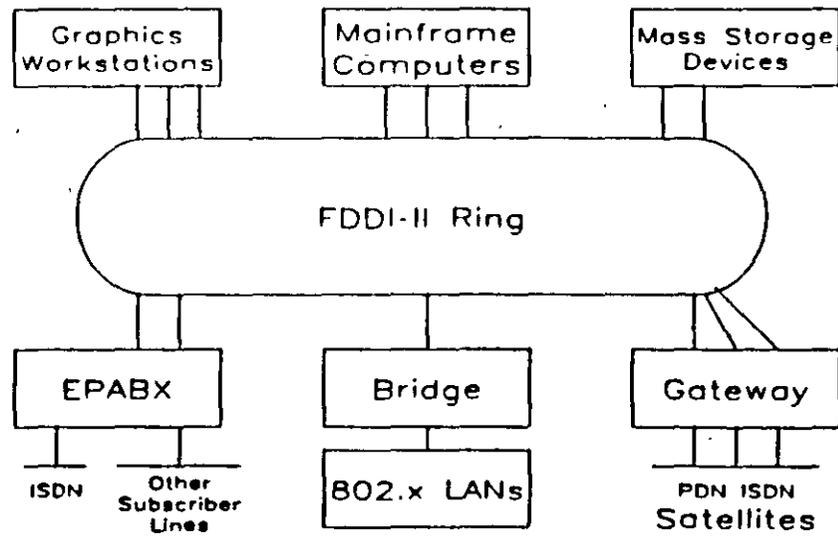
Doble anillo bajo el método TOKEN PASSING a 100 Mbps
basado en el estándar IEEE 802.5

- FDDI - II

Transmisión en el tiempo real de voz digitalizada y video de
"Barrido Rápido".







IEEE 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.



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 Slotted Ring	ISO 9314 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 INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

**CABLES, MEDICIONES E INSTALACIONES DE FIBRAS
ÓPTICAS**

**EXPOSITOR: M. EN C. RAÚL UGALDE M.
PALACIO DE MINERIA
JUNIO DEL 2002**



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 influenciados 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 permitira establecer un criterio de diseño en cuanto al tipo de estructuras de cable optico 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:

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

Donde

A = constante que depende del tipo de fibra óptica empleada

P_i = potencia óptica

β = 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

Δ = 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.

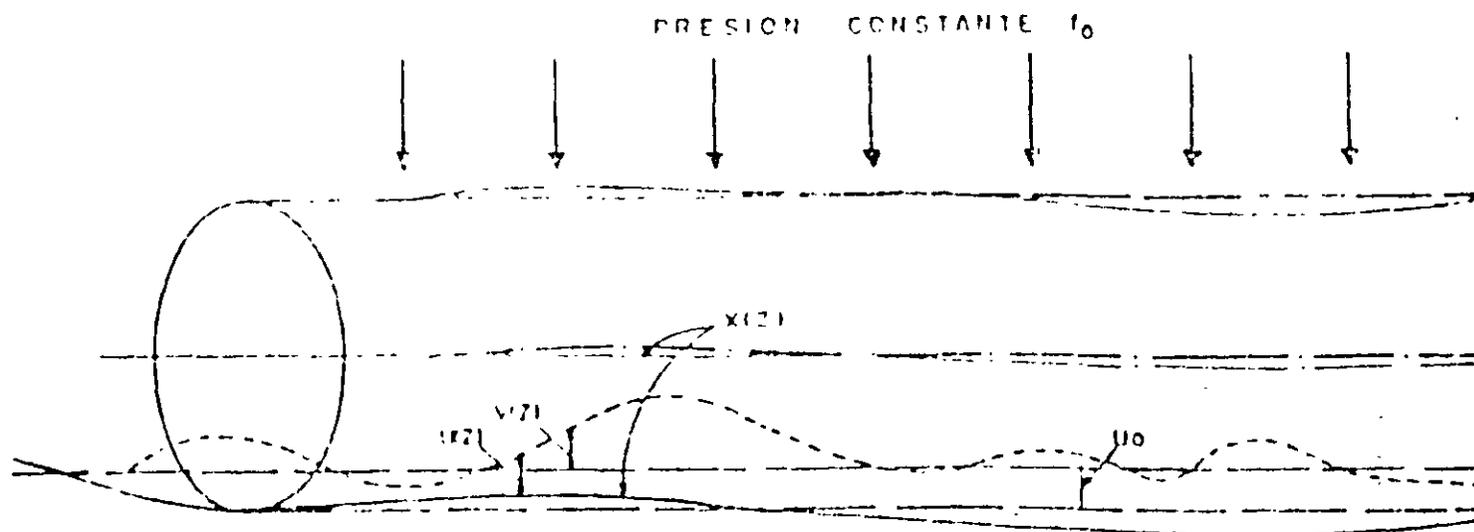
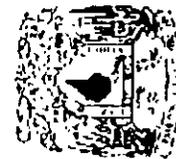


FIGURA 5.-1.- FIBRA PRESIONADA CONTRA
UNA SUPERFICIE RUGOSA

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
LABORATORIO DE INVESTIGACIONES EN TELECOMUNICACIONES
TELECOMUNICACIONES VIA MICROONDAS





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:

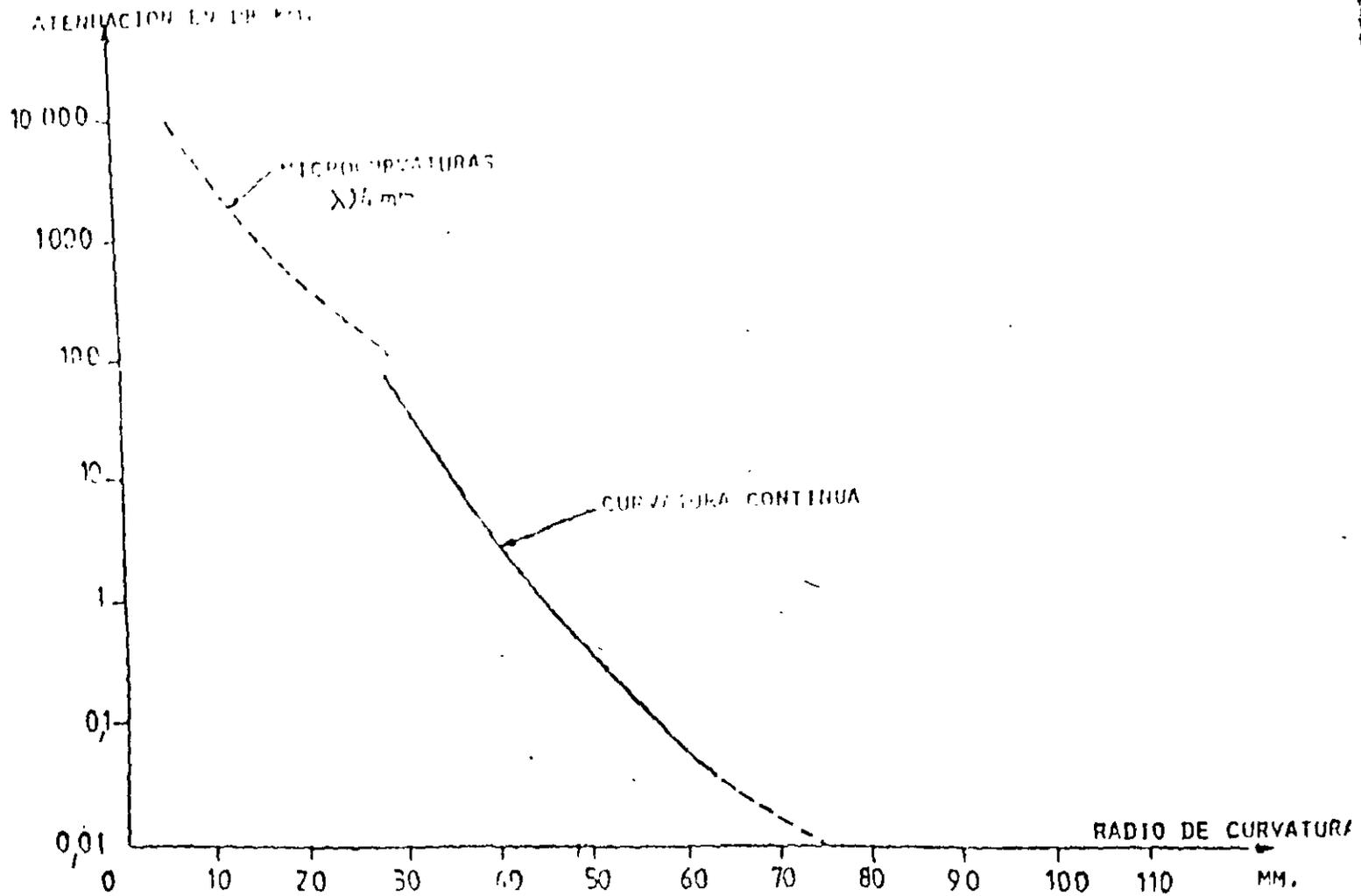
- Incremento del diámetro de la cubierta de la fibra, con el fin de aumentar su capacidad para soportar mayores tensiones antes de que aparezcan las microcurvaturas.
- Disminución del diámetro del núcleo de la fibra, para reducir el coeficiente de atenuación
- Eliminación de la tensión T de la fibra 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

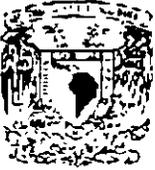
Las fibras ópticas sometidas a esfuerzos de tensión bajo condiciones ambientales difíciles de temperatura y humedad se ven expuestas a un proceso de envejecimiento que da como resultados la ruptura de la fibra en un cierto tiempo. Dicho proceso sufre una aceleración debido a la existencia de las llamadas microfrazuras, 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 microfrazuras, 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 microfrazuras en la fibra óptica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION CONTINUA FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES
TELECOMUNICACIONES VALMIERDONI 15

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





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

σ_0 = tensión inicial sobre la fibra óptica

σ = 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 periodo 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

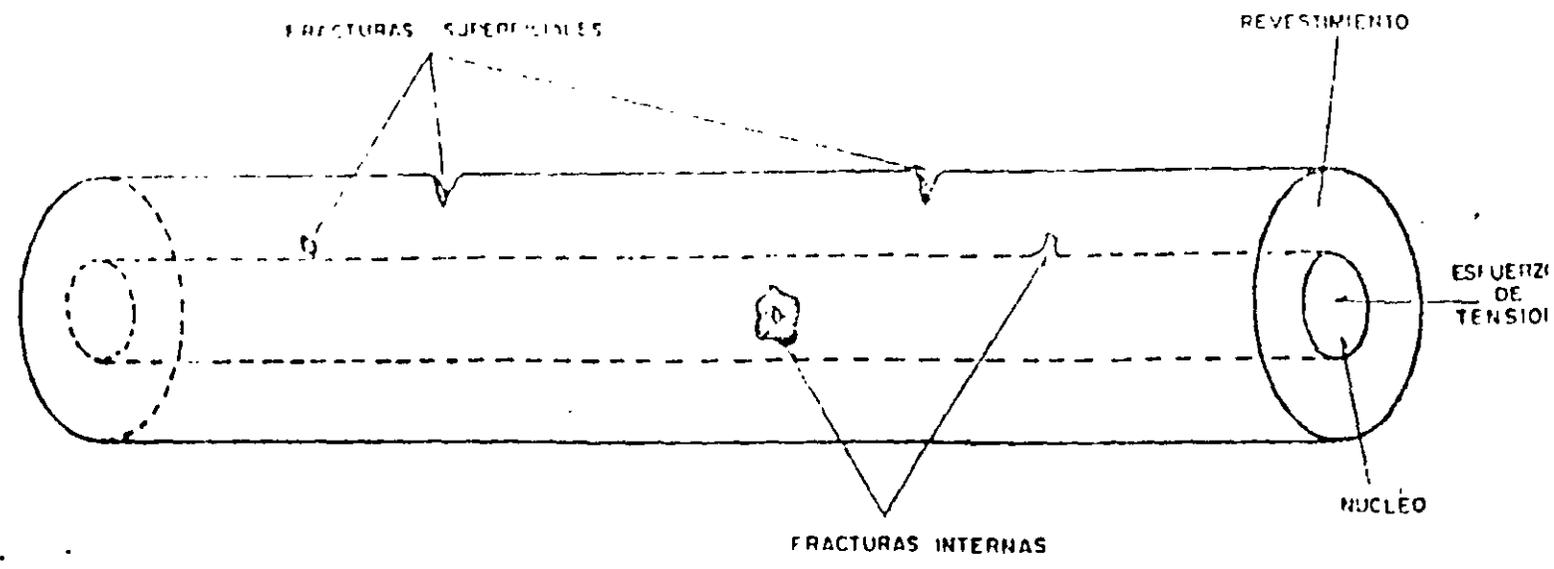


FIGURA 5.-3.- MICROFRACTURAS EN LA FIBRA OPTICA

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
 DIVISION DE INVESTIGACIONES EN TELECOMUNICACIONES
 LABORATORIO DE FIBRAS OPTICAS Y MICROFOTONICA

ALIQUOTADO



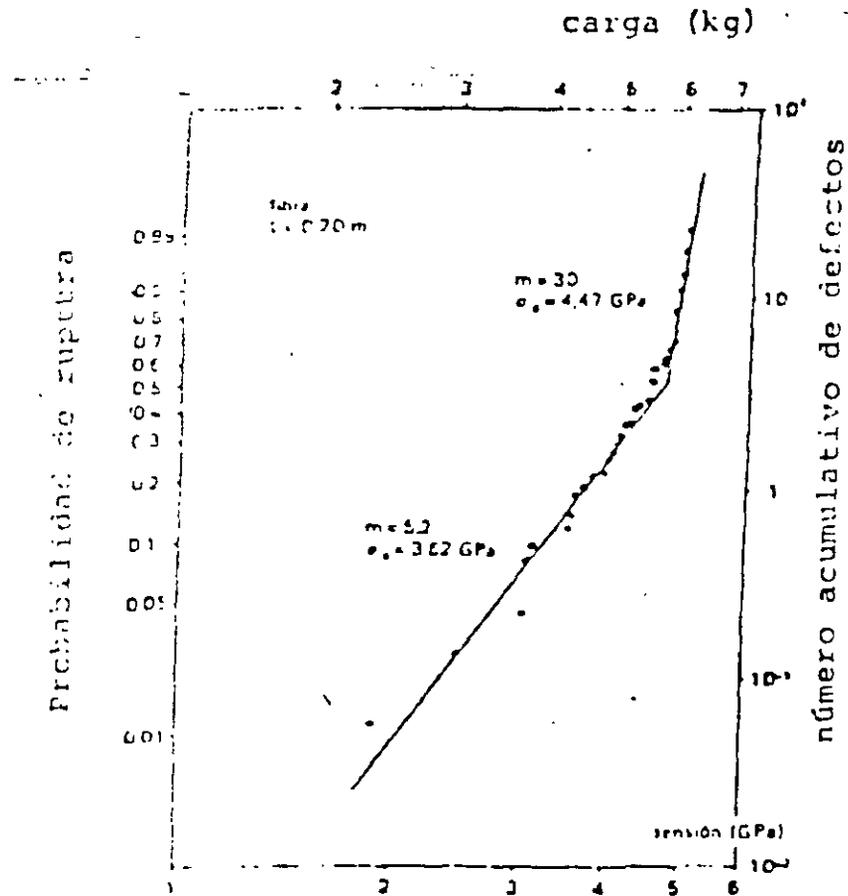


FIGURA 5 -4 PROBABILIDAD DE RUPTURA EN FUNCION DEL ESFUERZO DE TENSION

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 modulos de elasticidad de los materiales que componen al cable óptico, su resistencia mecánica (resistencia a la tracción R_r , y compresión R_e) y el 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 (α), a fin de prevenir las pérdidas por microdoblecés 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 permite: 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 OH^- y a la compresión lateral, por lo que su manejo debe ser delicado.

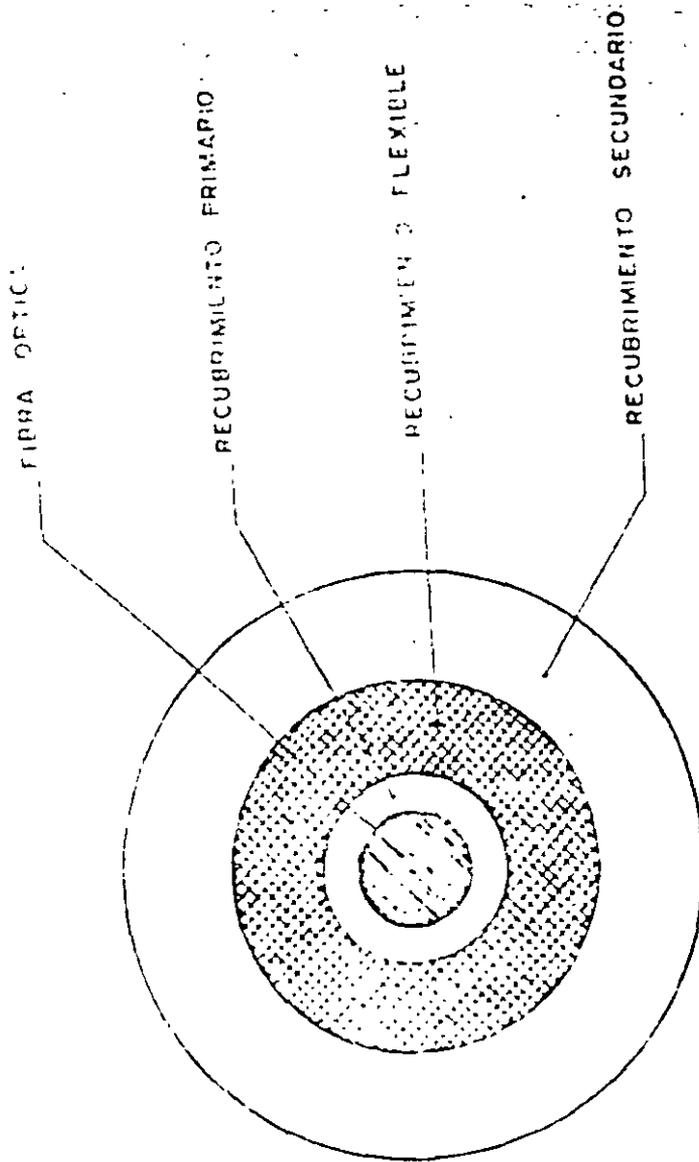


FIGURA 5.-5.- FIBRA OPTICA DE TRES CAPAS

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 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.

Es. ucturas Libres

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

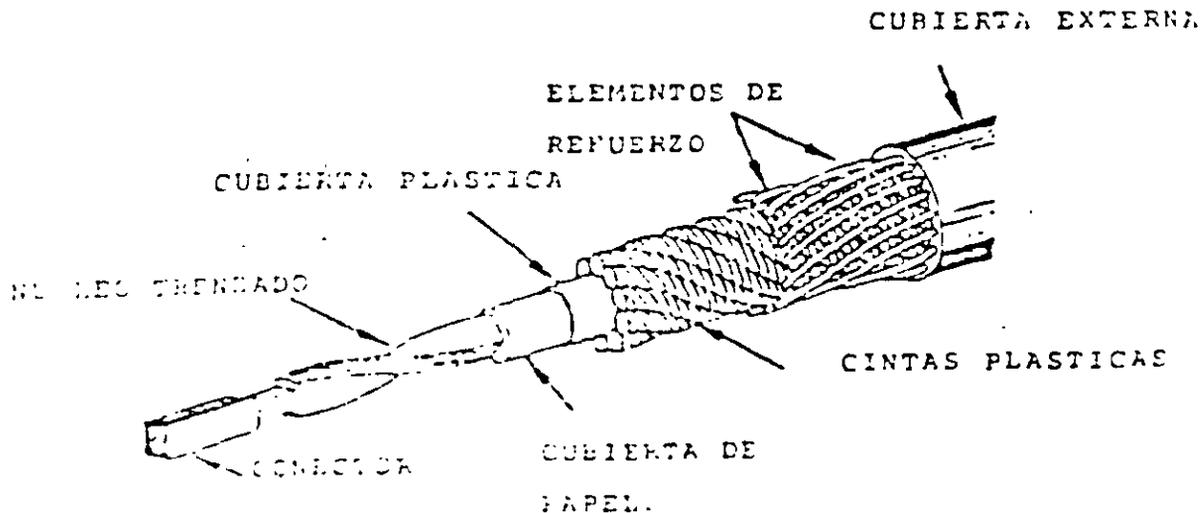


FIG. 5-6 Cable Óptico que contiene 144 fibras

a) Estructura de fibras libres en tubos

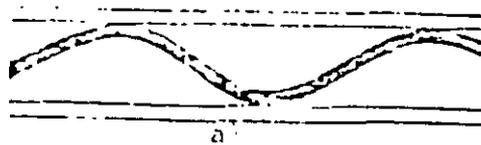
El principio básico de estas estructuras es permitir un margen de elongación a la fibra óptica contenida en un tubo de plástico extruido. Cada fibra contenida en dichos tubos presenta una ventana de elongación/contracción en la que la fibra óptica permanece libre de esfuerzos; esta ventana se determina por el espacio interno de la fibra óptica en el tubo (w), y el periodo de la hélice (u) 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 (ϵ^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



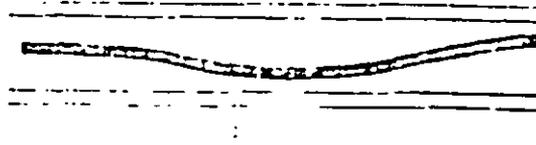
puntos en que la fibra se apoya en la pared interna del tubo. Esta situación produce un incremento en la atenuación y de los efectos de fatiga estática.

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 periodos cortos de tiempo, lo que implica necesariamente una reducción al máximo del tiempo de tendido (ver fig 5.-8).

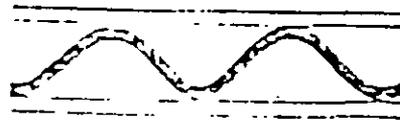
De manera contraria, también se puede presentar un incremento en el margen de elongación (ϵ^s) a causa del encogimiento de los materiales plásticos del tubo durante enfriamiento. La atenuación permanece fija hasta que los efectos del enfriamiento producen un acortamiento de la hélice de la fibra, generando 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)
Disminución 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 es-
tructuras de tubos libres.

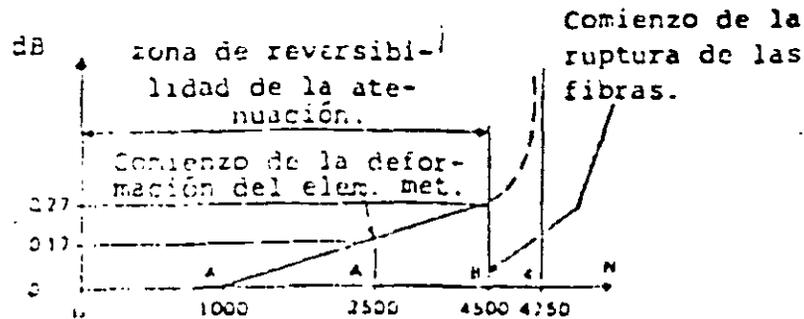


Fig. 5.-8 Comportamiento mecánico de una estructura libre.

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 esta 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 alveolos en forma hexagonal, con un círculo inscrito de 450 μm de diámetro

El cable óptico se construye termosellando dos bandas de aluminio cubiertas en sus caras opuestas por una película de polietileno se acopian 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)

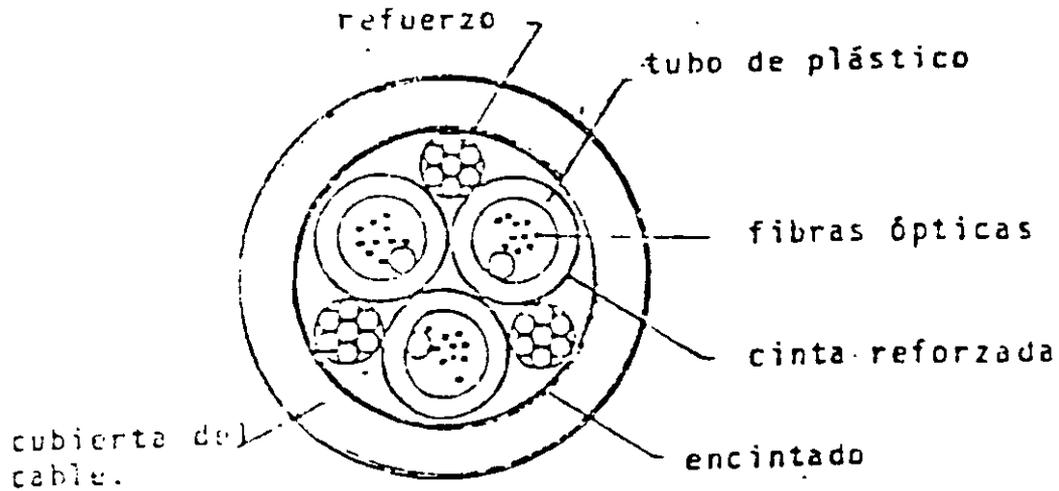
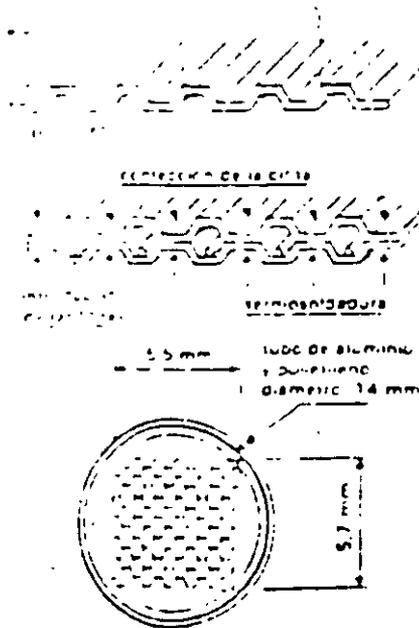
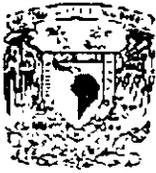


FIG. 5.9 Estructura de fibras libres trenzadas.





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 termica α).

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 (ϵc):

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

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

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

3) Si al radio de curvatura continuo (Rc) radio periódico de la hélice (μ) cuando, se tiene holgura de la fibra en la cavidad se establece el margen de elongación (ϵ^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 teorica se expresa como:



$$\epsilon t = \frac{\epsilon c}{2} + \epsilon s$$

(5.-8)

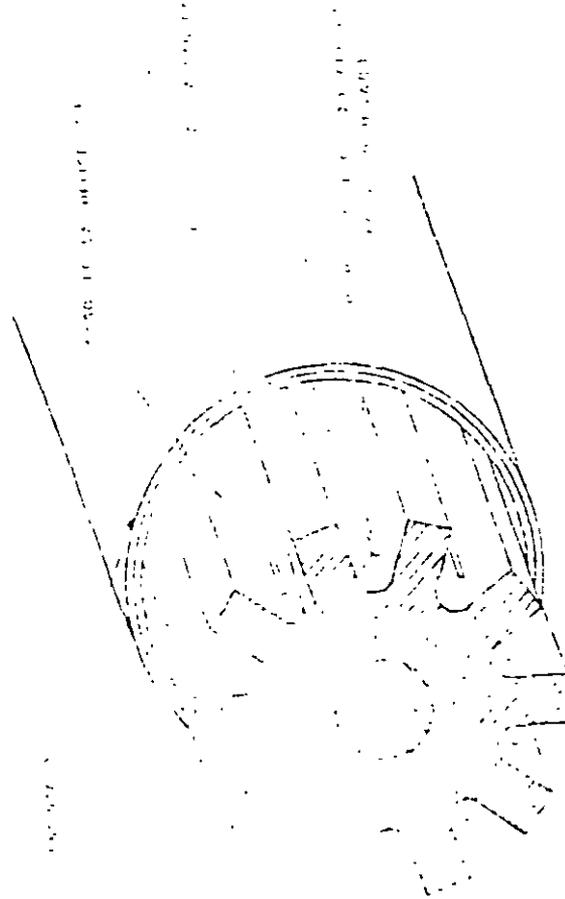


Fig. 5.11 Estructura cilíndrica ranurada en "V"

5) La combinación de la curvatura continua (R_c) y la curvatura periódica (μ), induce un esfuerzo de curvatura estático (σ_a) que debe exceder a un valor (σ_{al}), el cual se determina por



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

Siendo E_{df} 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 (R_s), 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 $h = 0.67$ mm.), 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 (α_c) con un valor de 5×10^{-7} y para el cilindro ranurado de 1×10^{-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.

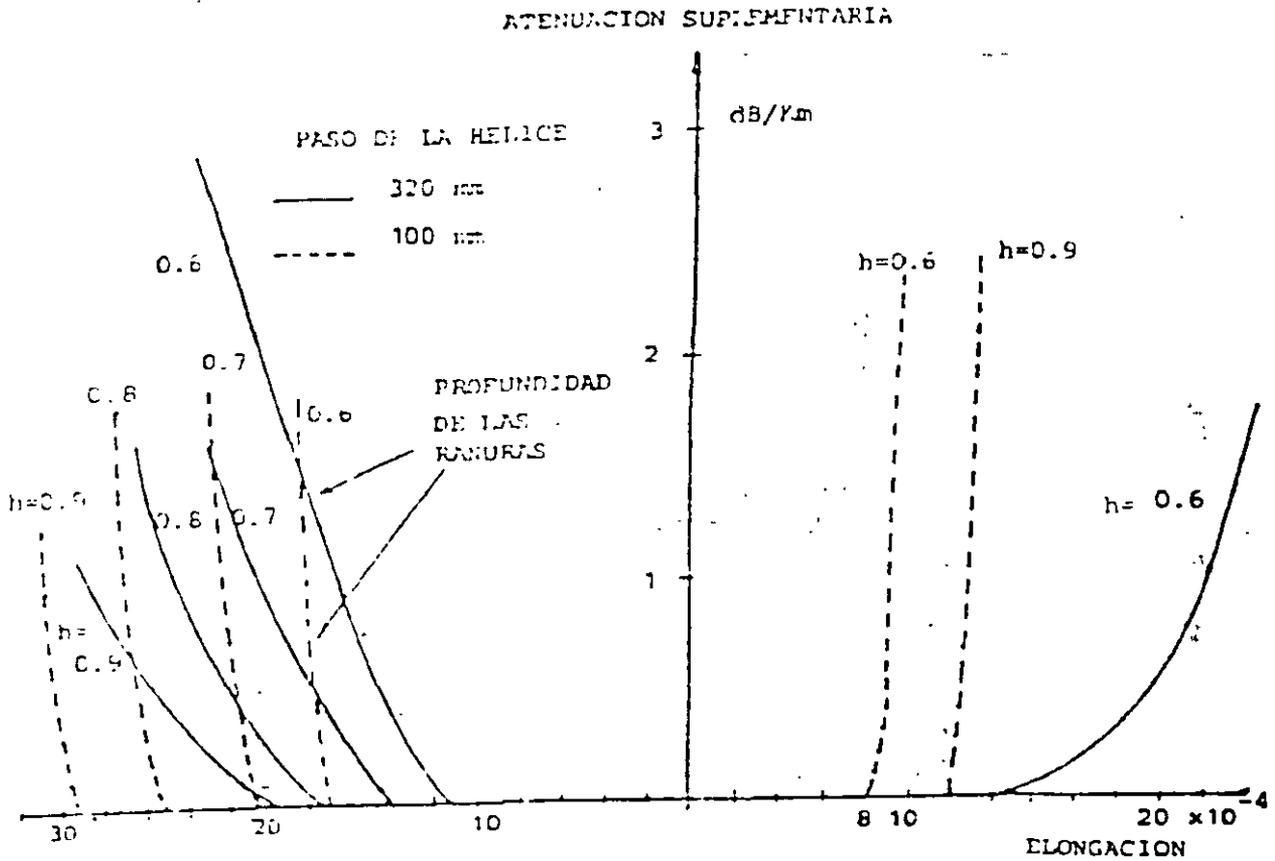


Fig. 5.-12 Atenuación del cable en función de la elongación y compresión para diferentes valores de h.

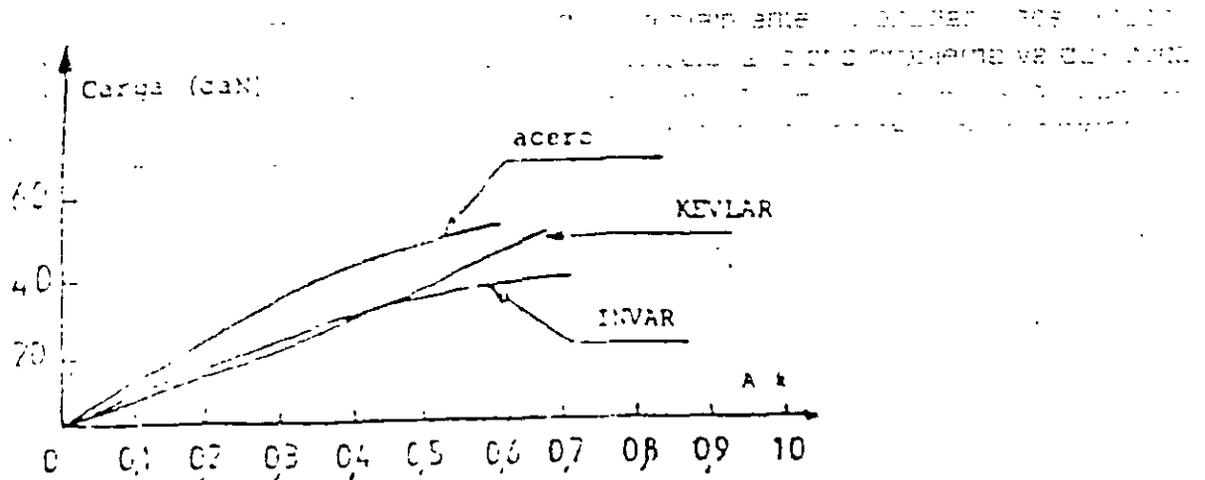


Fig. 5-13 Prueba de tensión para el elemento de refuerzo de la estructura cilíndrica ranurada.

Las estructuras antes mencionadas son las más comunes en el mercado mundial, presentando algunas, mas 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 μm , 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 μm	1.3 μm	1.55 μm
ANTES DE LA FABRICACION	2.9 dB/Km	0.6 dB/Km	0.4 dB/Km
DESPES 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 esta 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 esta dada por holgura en el diseño del cable, de manera que los parametros geométricos del mismo tienen un papel muy importante; en forma comercial es posible obtener cables con un rango de operación de -60° 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 contruidos de manera independiente. Solamente con un adecuado control de las diferentes etapas de fabricación del cable se podra obtener una reducción del número de fallas durante la instalación y puesta en operación del mismo.

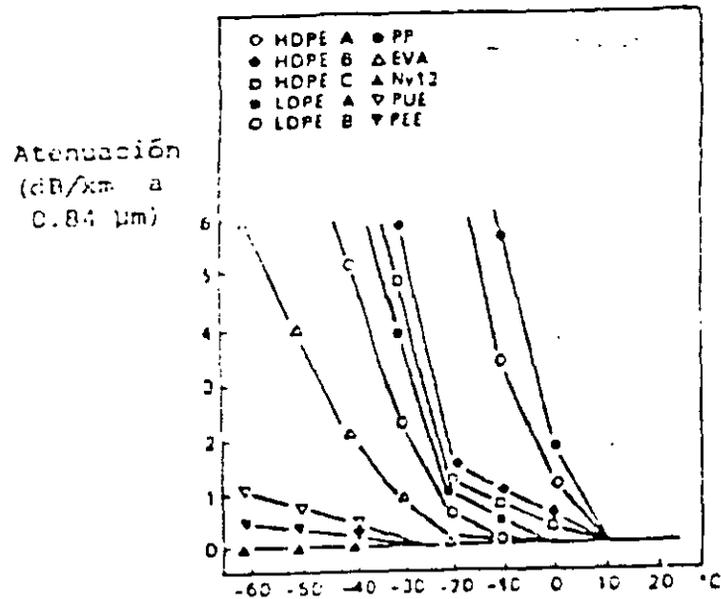
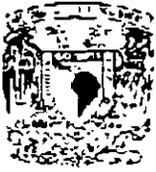


Fig. 5.-15 Atenuación adicional de las fibras de tres capas a bajas temperaturas.

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.

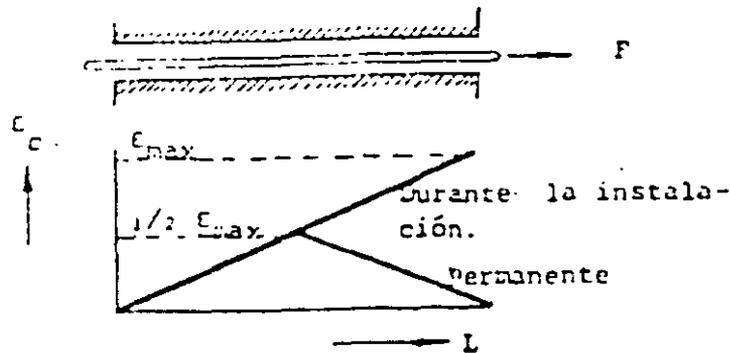
Como cada una de ellas presenta características especiales, éstas serán analizadas por separado.

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



Las 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 las zonas donde debe 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 las cargas atmosféricas sobre el cable lo que puede dañar al cable óptico si no posee un amante 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.

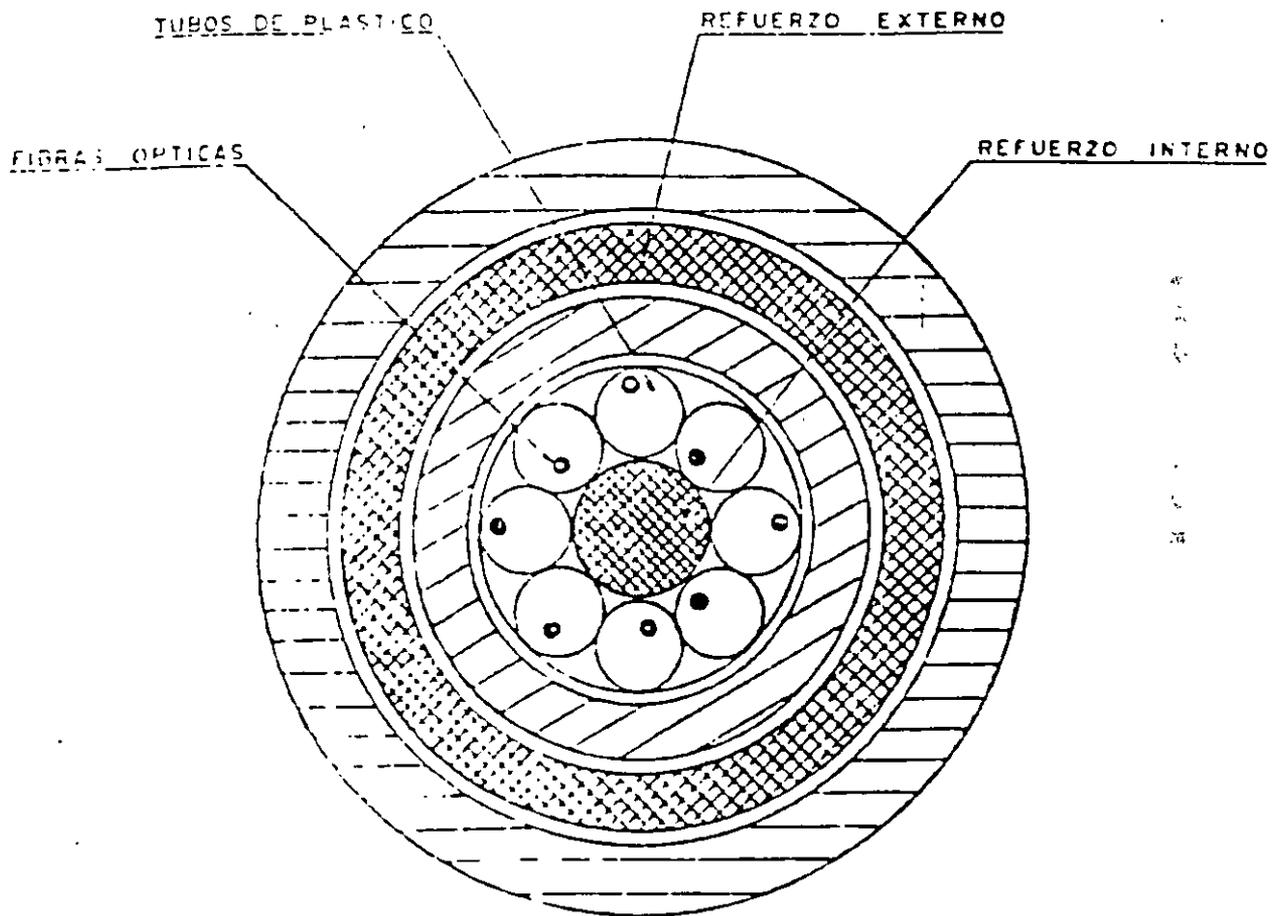


FIG. 5.27 CABLE AUTOSOPORTADO



Fig. 5-18 Cable Óptico unido a mensajero



FIBRAS OPTICAS

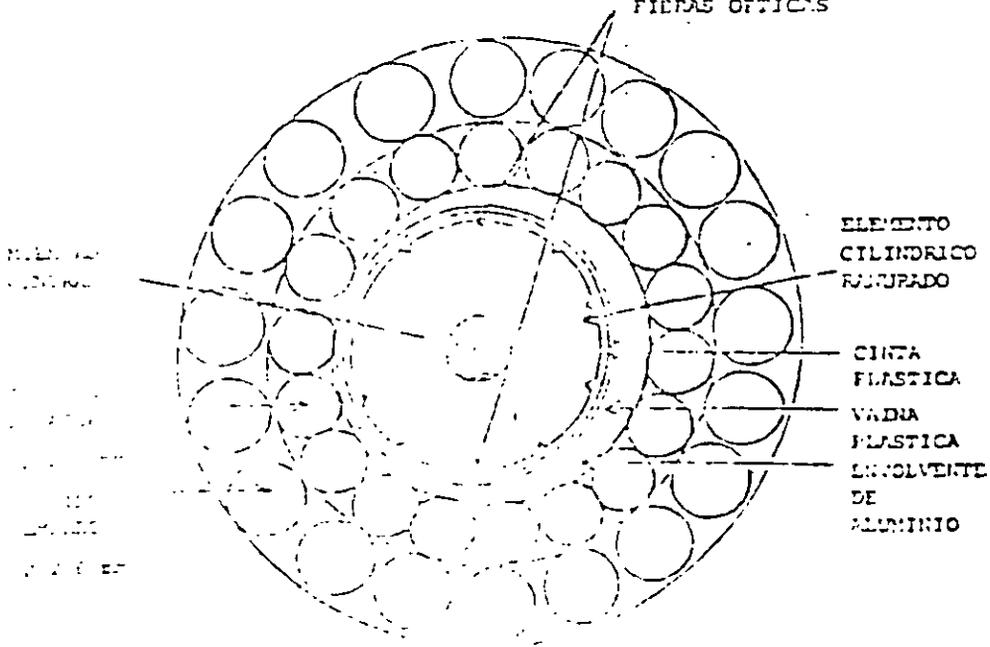
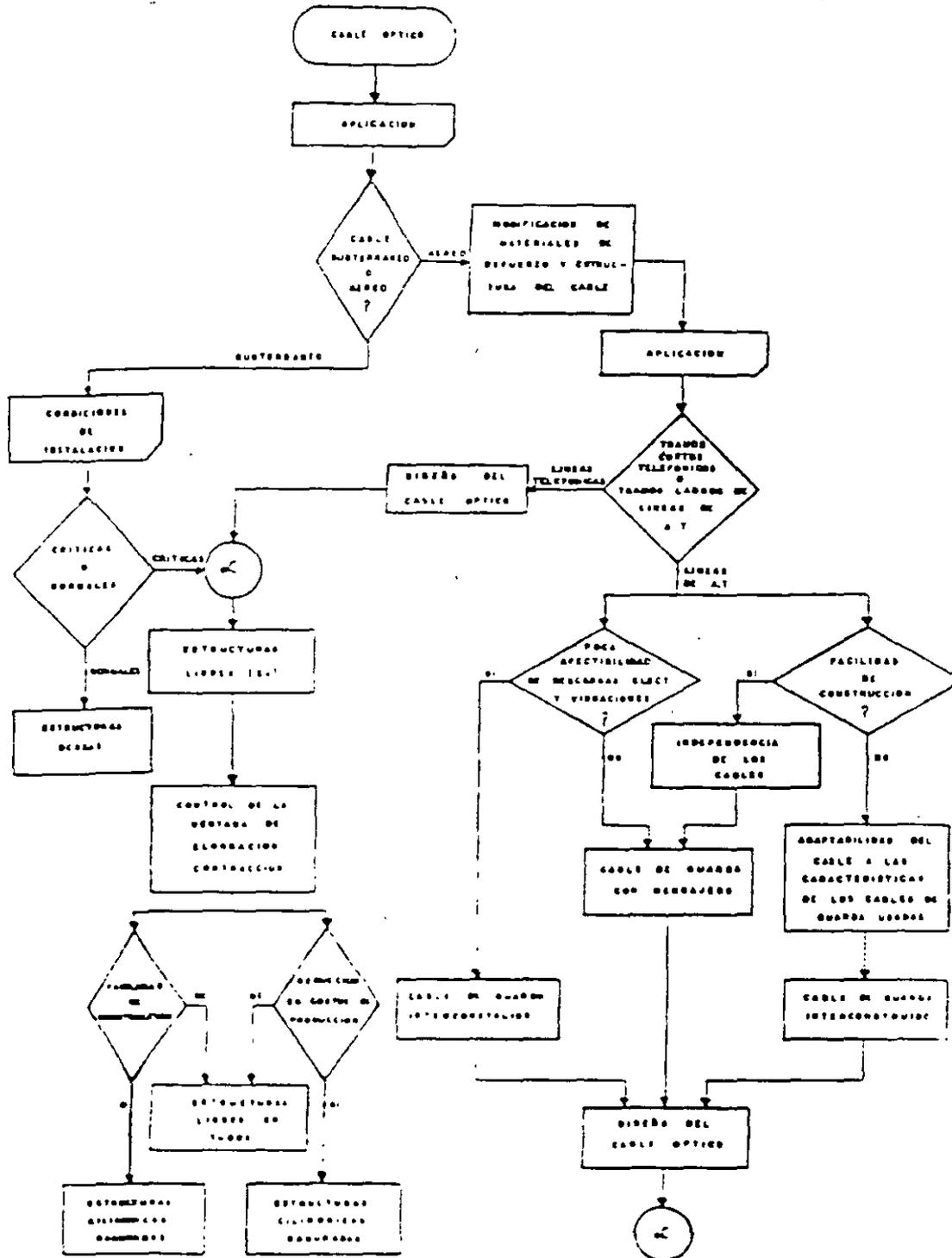


Fig. 5-19 Cable óptico construido en el cable



1920 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO Y SELECCION DEL CABLE OPTICO SEGUN SUS PRINCIPALES APLICACIONES



c) Instalación Submarina

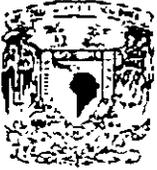
La aplicación de las fibras ópticas en cable submarino es una de las que se espera obtener mayores beneficios de comunicación; desde hace varios años se ha venido experimentando en países como Japón y Canadá los enlaces submarinos para la intercomunicación entre islas o con el continente.

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^{38 38} 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 μ 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 μ 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 μ 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



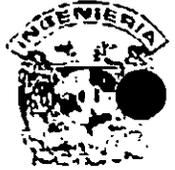
respecta a medios alternativos de comunicación como son transmisión de datos para enlaces interurbanos entre computadoras o la transmisión de canales de video, todo ello en la misma línea óptica a través de los diferentes métodos de multicanalización disponibles. Para este tipo de aplicación, la fibra 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 dB/Km para $0.85\mu\text{m}$ y 1.0 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 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 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 semiconductoras 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 confina 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 espaciamiento 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 espaciamiento 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 DISEÑO DE FIBRA OPTICA UNIMODO.

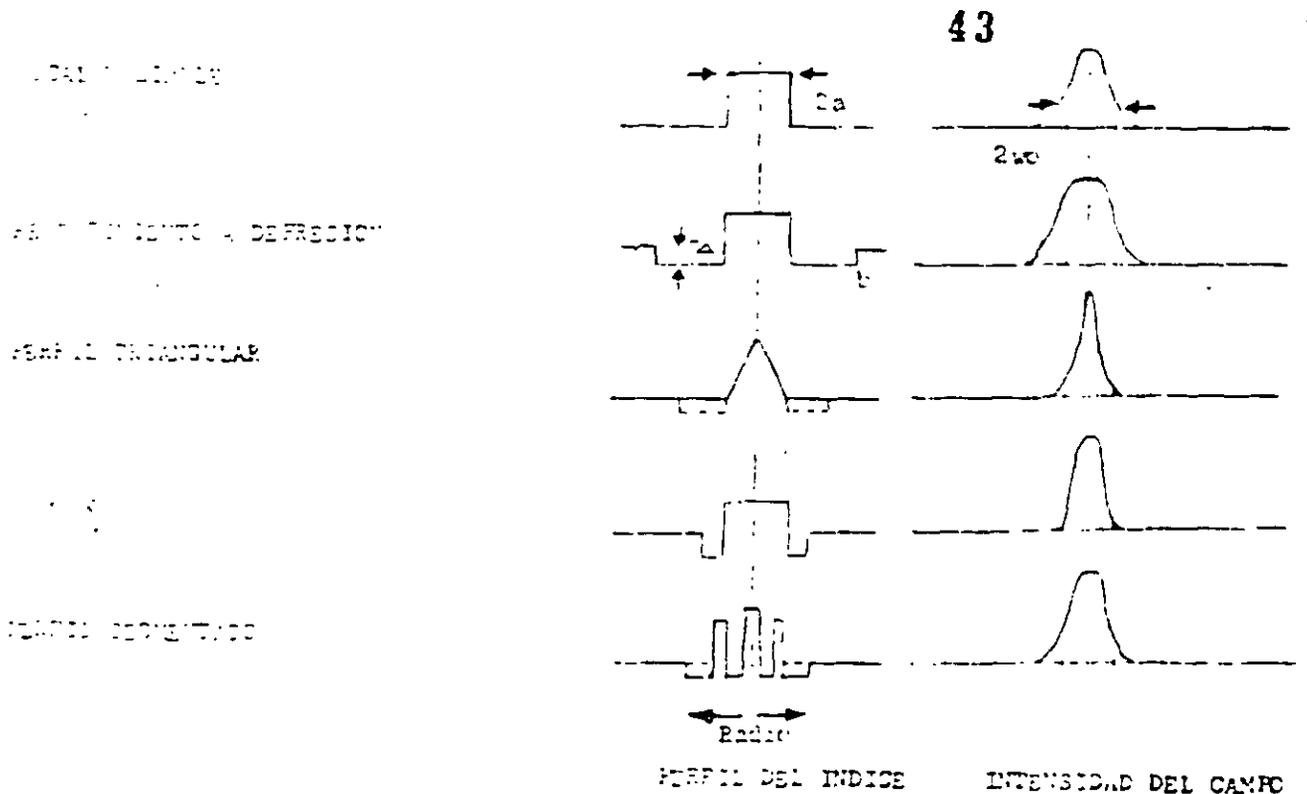
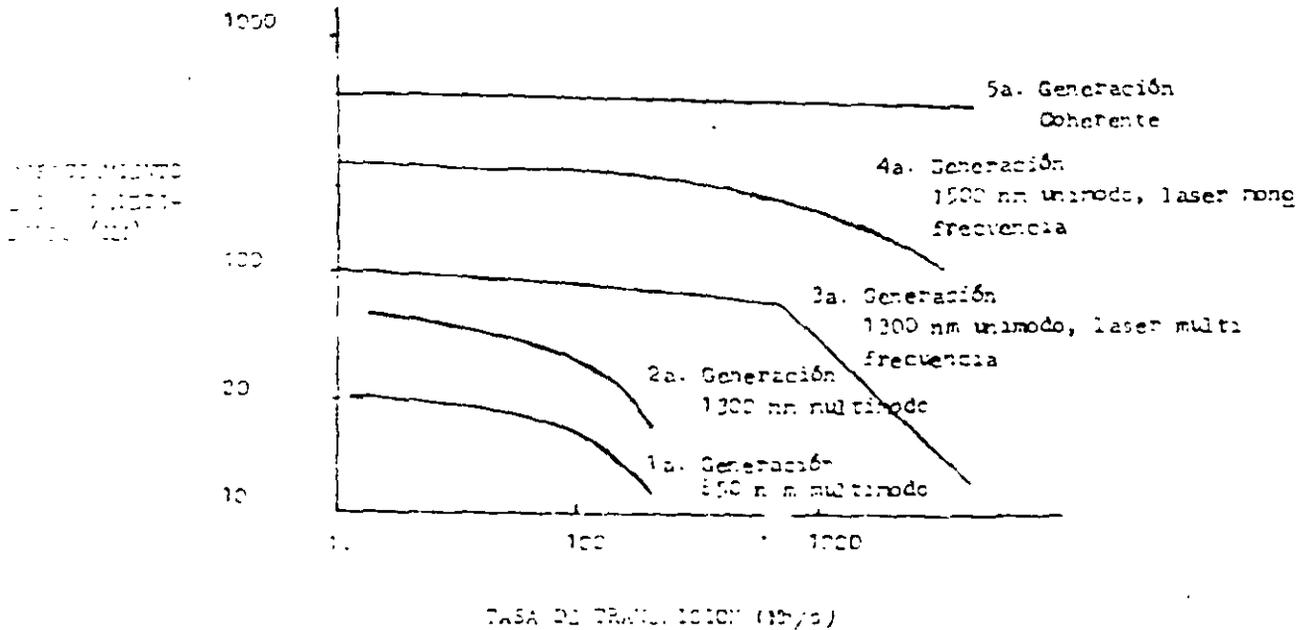


FIG. 5.22 5 GENERACIONES DE SISTEMAS DE COMUNICACION POR FIBRA OPTICA



Dichas fibras requieren de materiales cuya absorción por vibración molecular ocurre solo 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. Lertz, 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. Zaganaris "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" Comunicacion escrita CNET, Lannion Francia.
- 9 - Vecchis M. de, J. P. Hulin y J.C. Staath, "Ultra Low Loss -Cables Using the Cylindrical V-Grooved Structure", Thomson CSF/ LTT 30th Internacional 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 INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

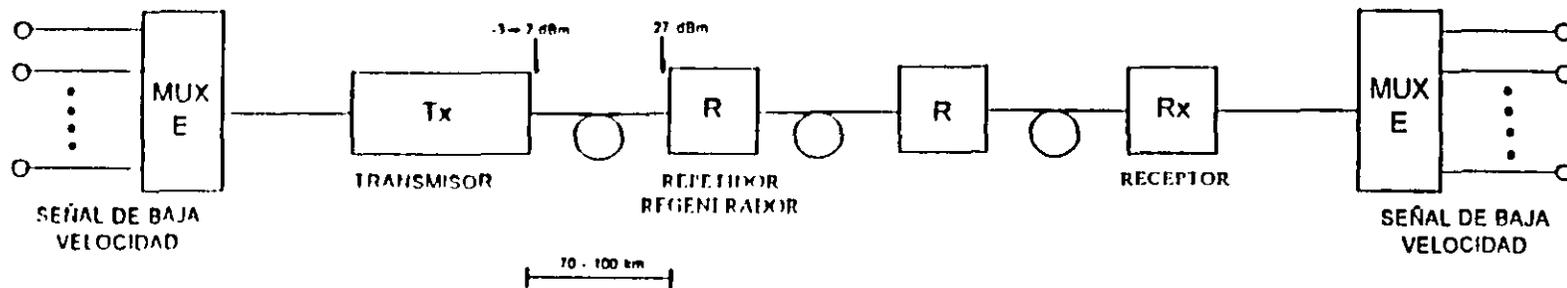
**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

AMPLIFICADORES DE FIBRA ÓPTICA

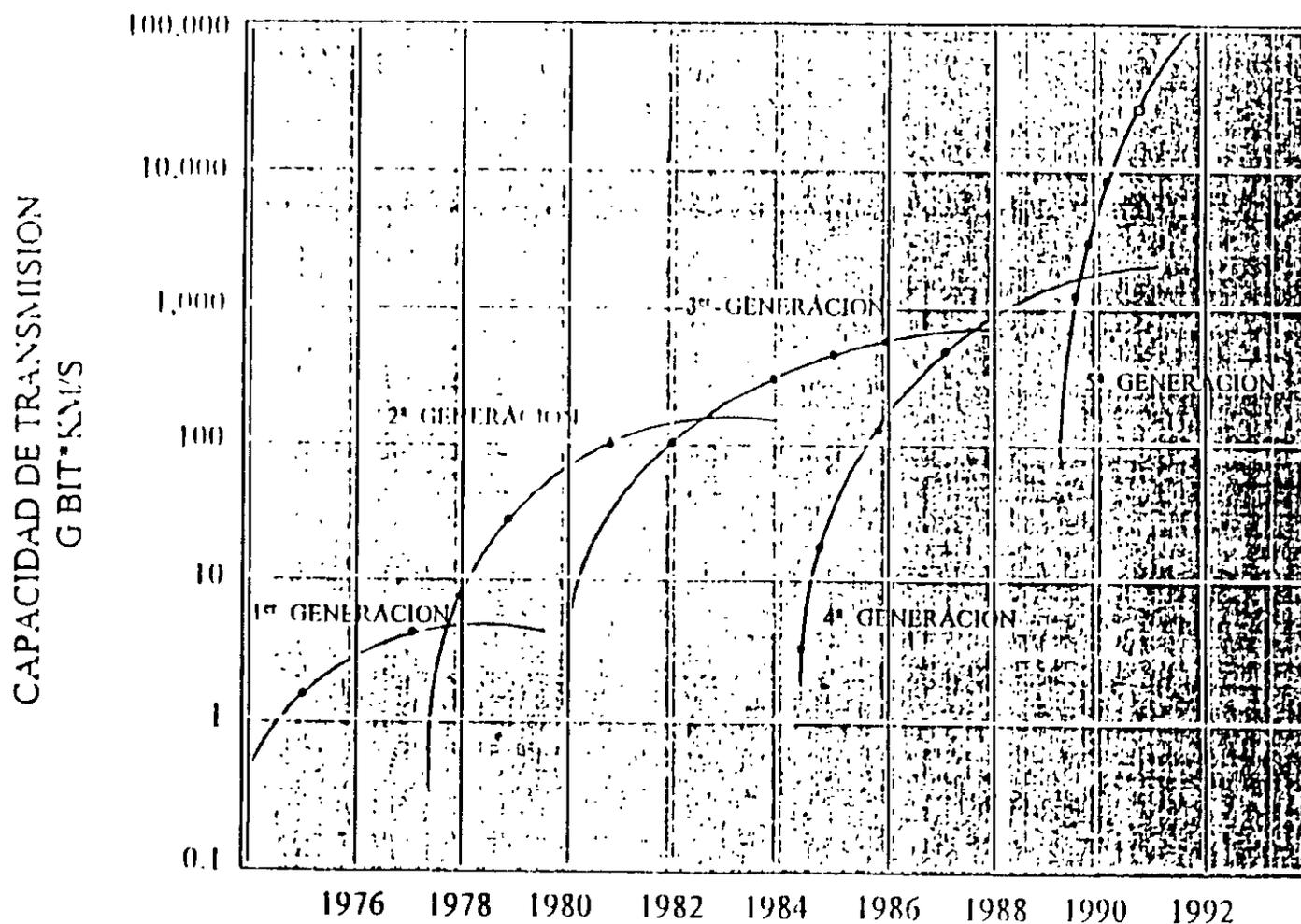
**EXPOSITOR: ING. FERNANDO MARTÍNEZ PIÑÓN.
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

SISTEMA TRADICIONAL DE TRANSMISION POR FIBRA OPTICA ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)



- 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. F. ANUEL DESURVIR E. SCIENTIFIC AMERICAN

GENERACIONES DE LOS SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA

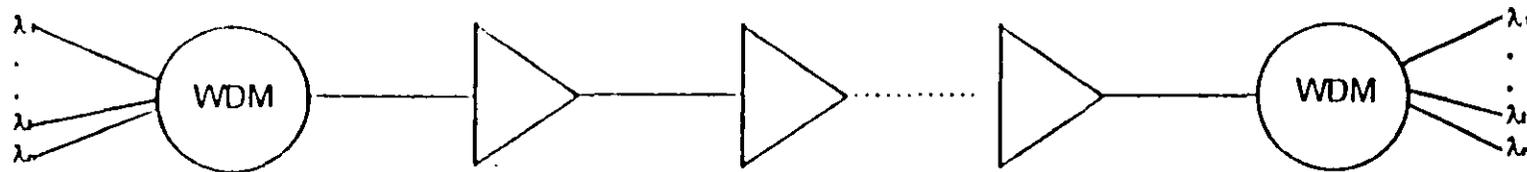
GENERACIÓN	Fecha de aplicación comercial	Longitud de onda de operación (nm).	Tipo de Fibra	Distancia máxima entre terminales o repetidores (Km)	Máxima velocidad de transmisión disponible comercialmente (Mb/s)
1ra	1978	850	Multimodo	10	34
2da	1982	1300	Unimodo	40	140
3ra	1985	1550	Unimodo	80	565
4ta	-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

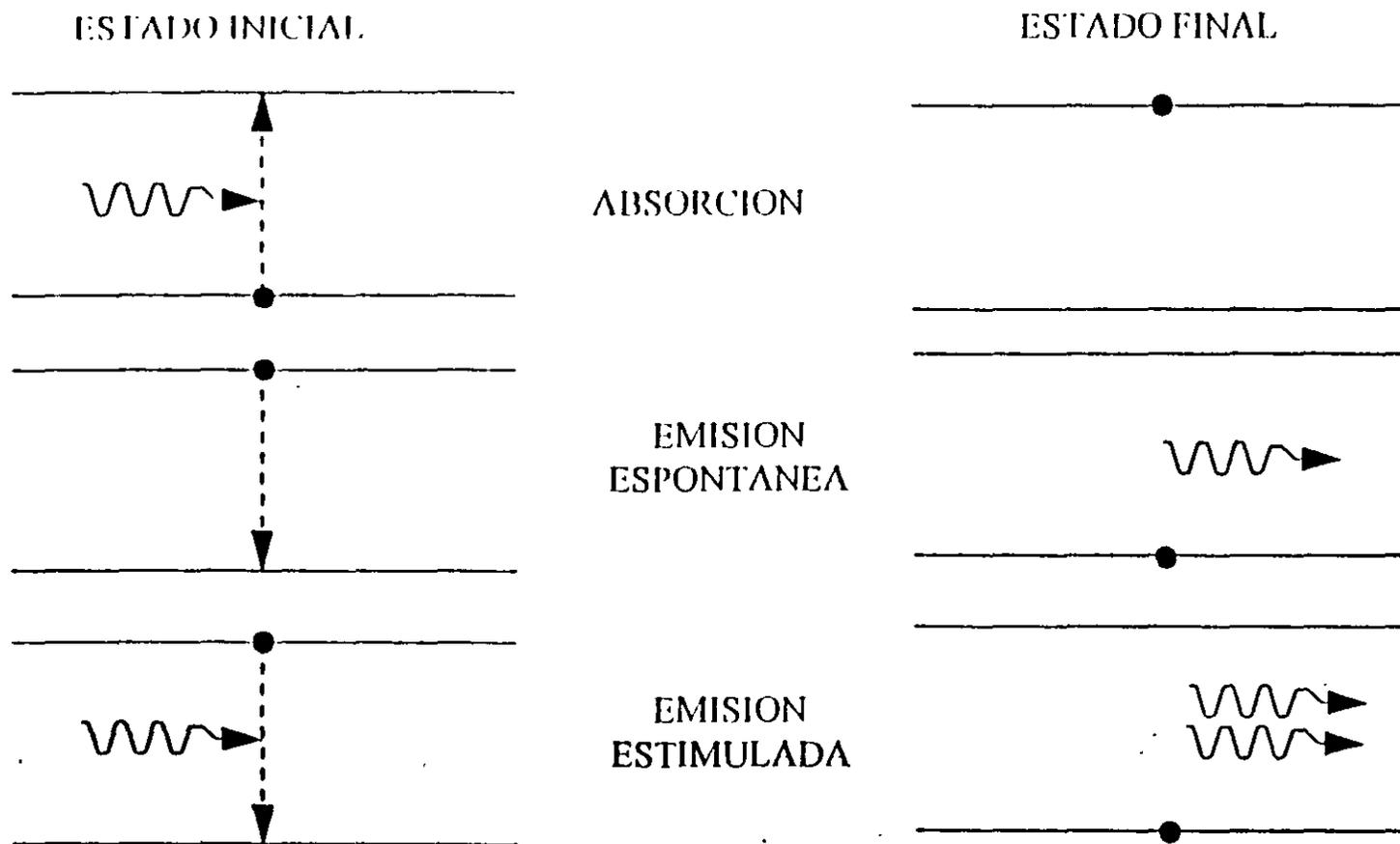
AMPLIFICADORES OPTICOS : PARTE I

¿QUE ES UN AMPLIFICADOR OPTICO ?

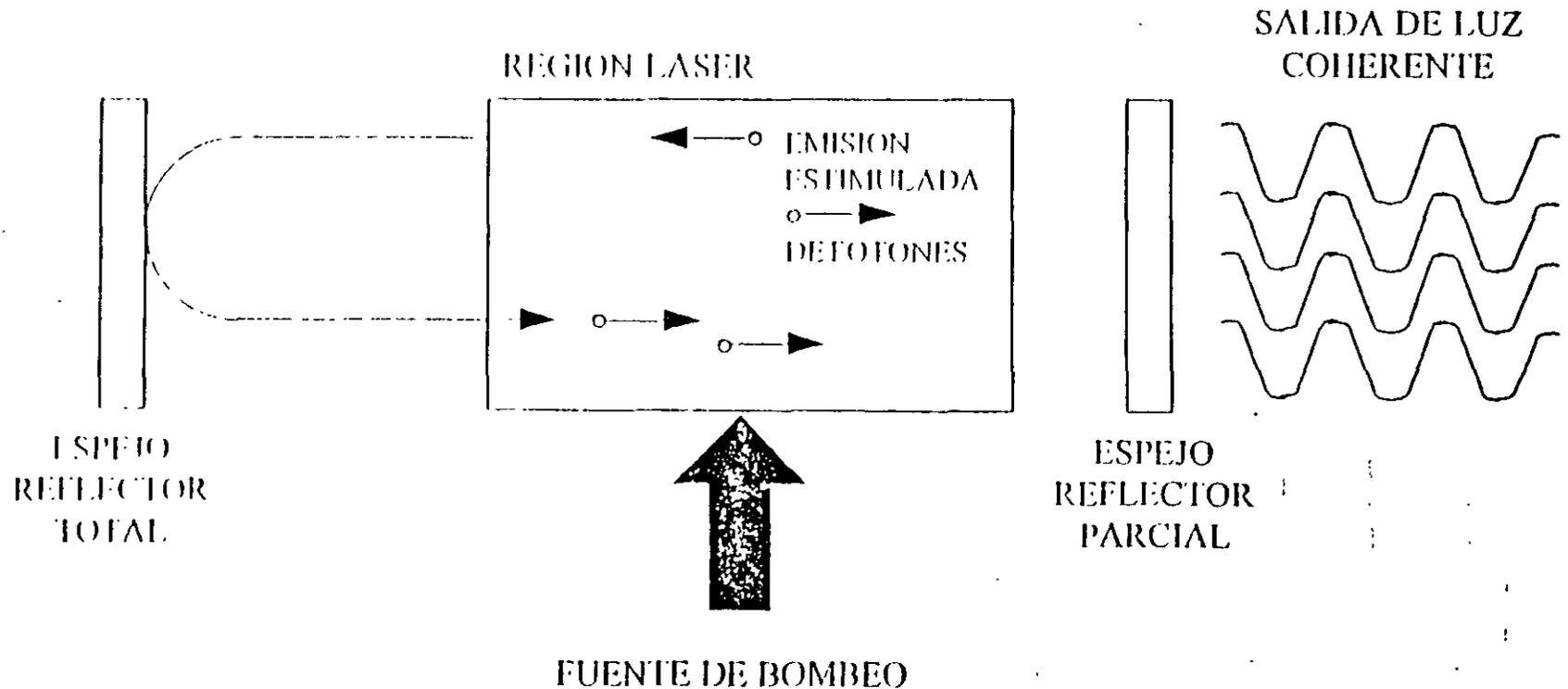
ORIGEN : EL EFECTO LASER

LASER : LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION.

PROCESO DE ABSORCION Y EMISION:

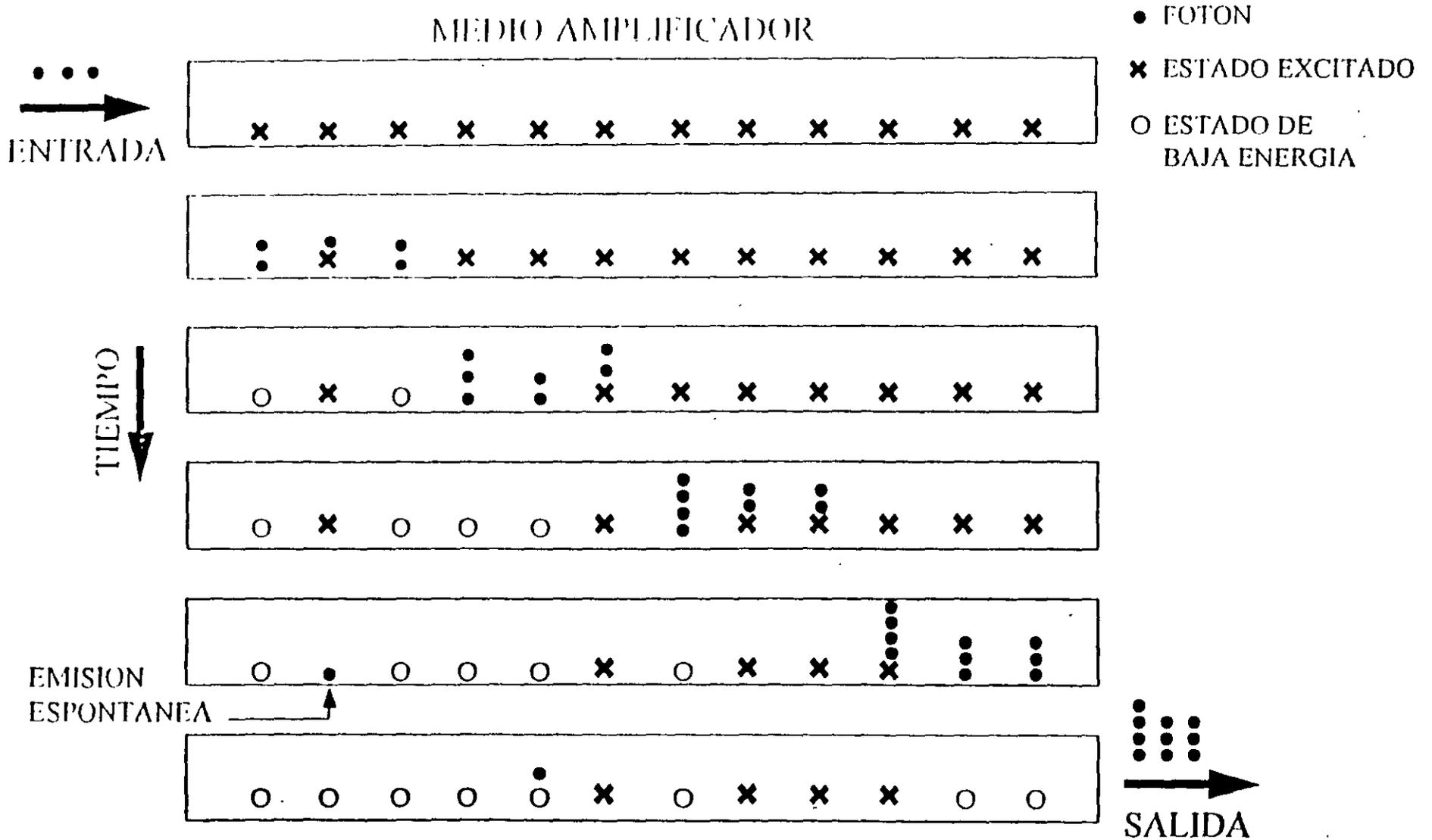


CAVIDAD OPTICA RESONANTE



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

TRANSITION ELEMENTS (BETWEEN GROUPS 2A AND 3A)

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

AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA)

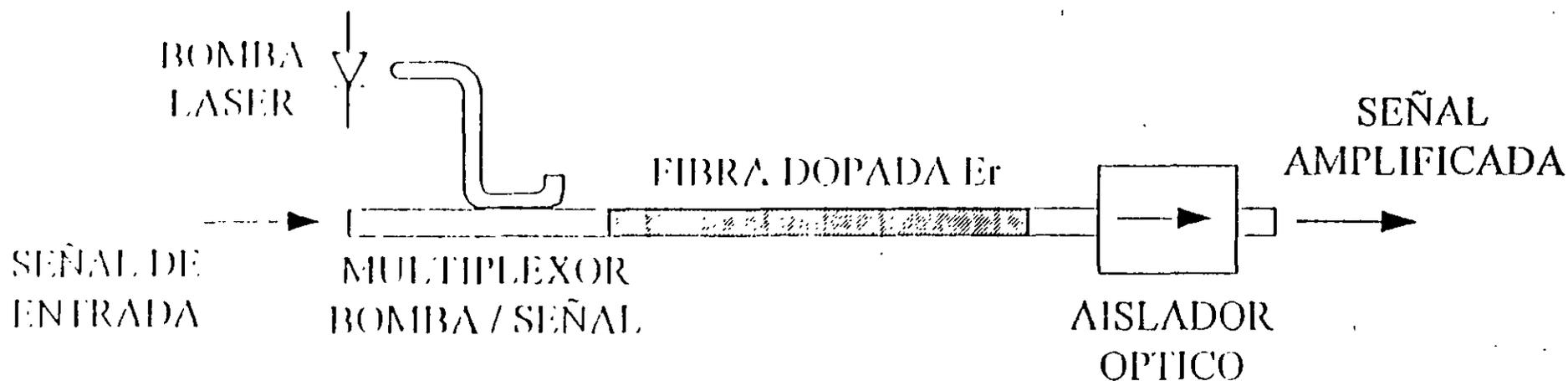
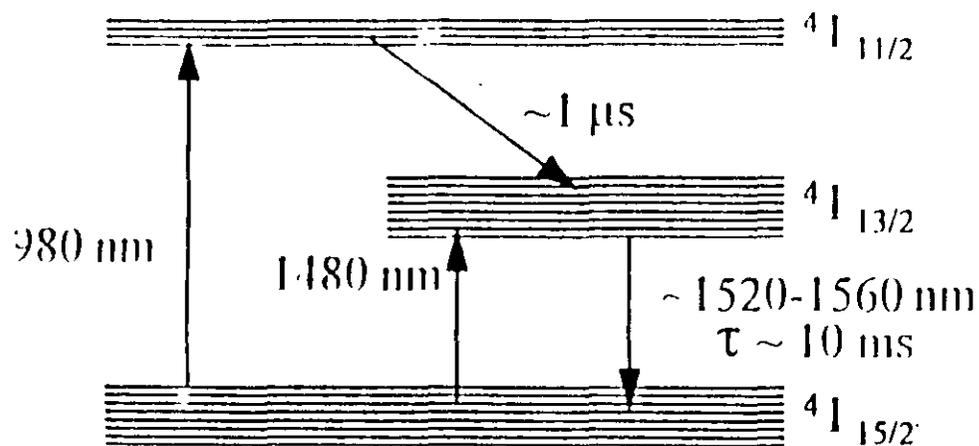


DIAGRAMA DE NIVEL DE ENERGIA



ESPECTRO DE EMISION Y ABSORCION

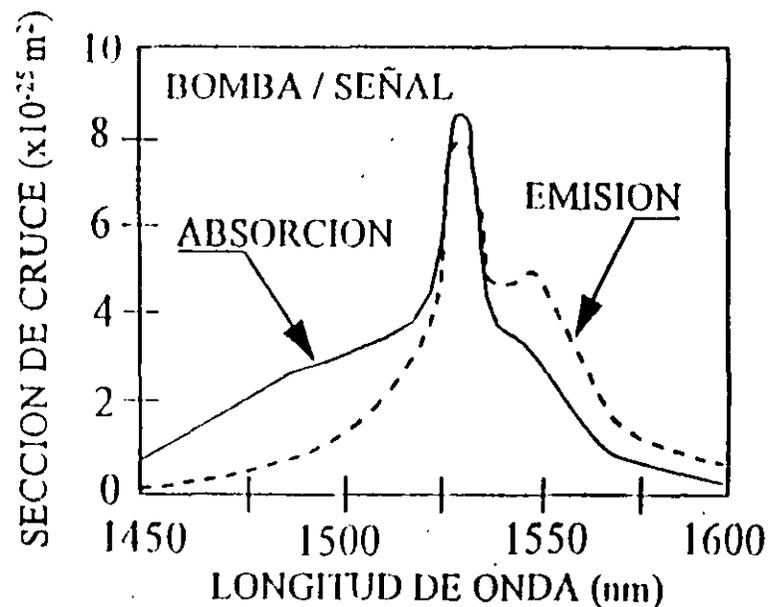
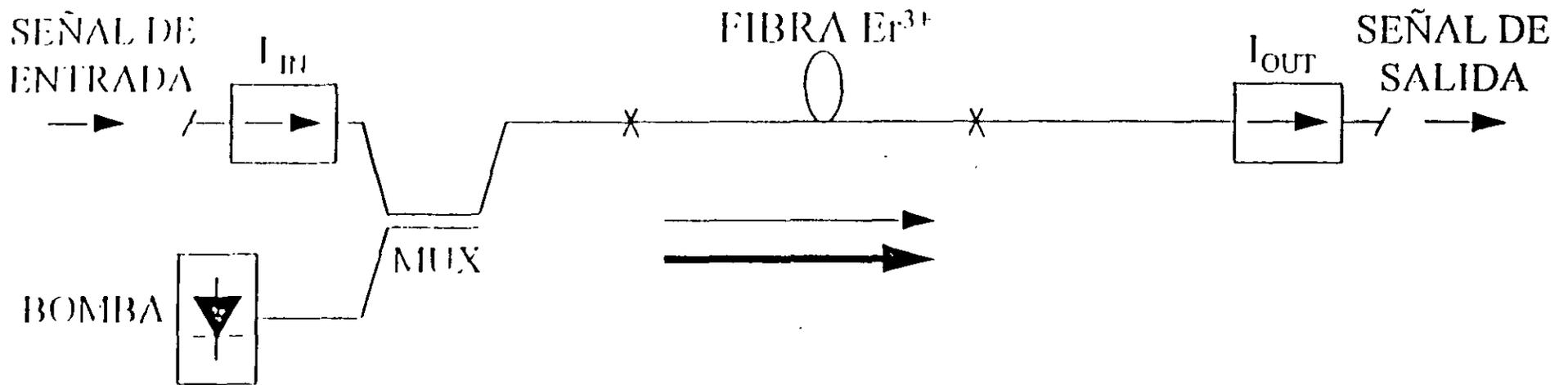
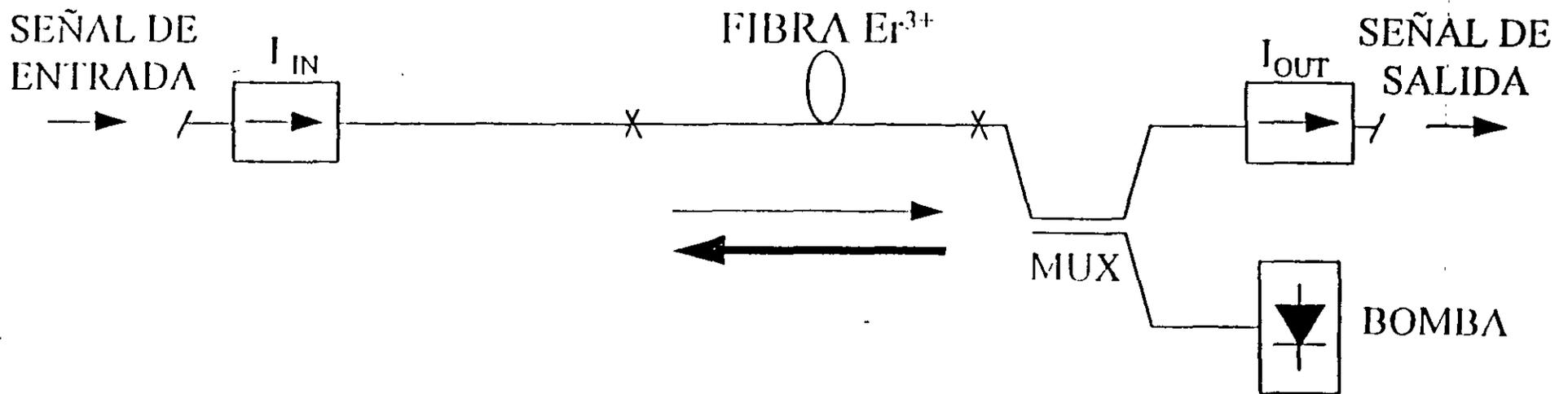


DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN EDFA

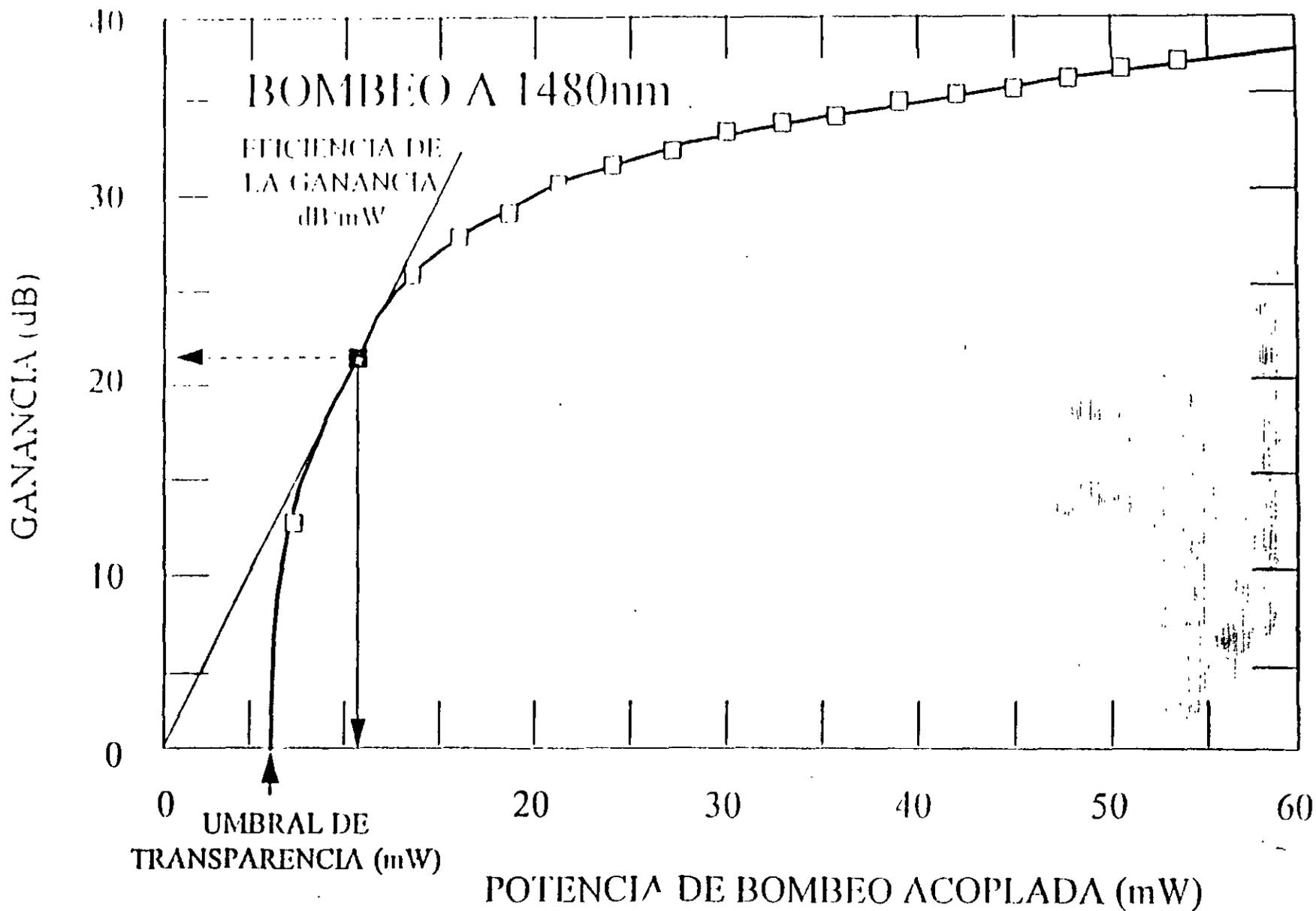
CODIRECCIONAL



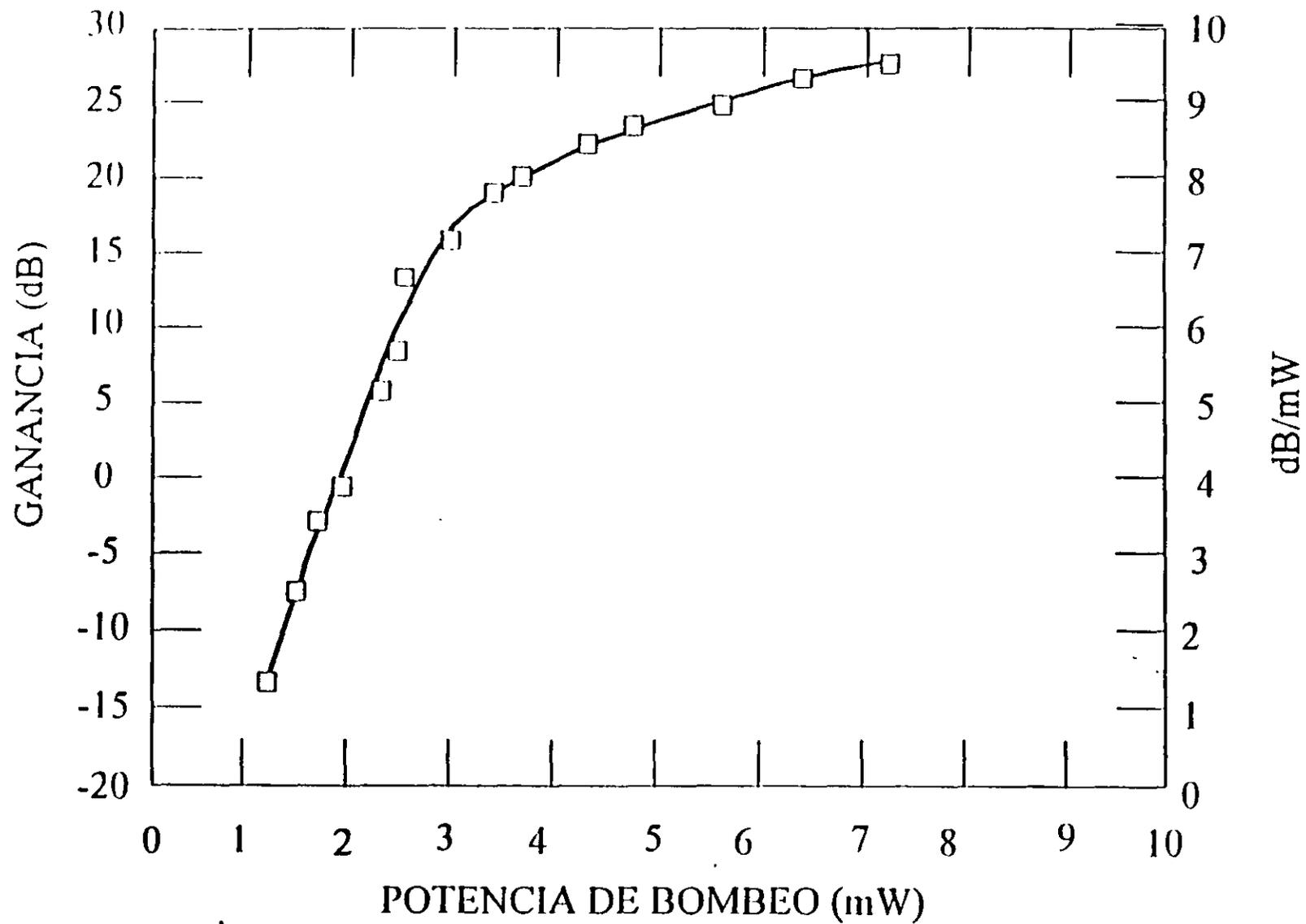
CONTRADIRECCIONAL



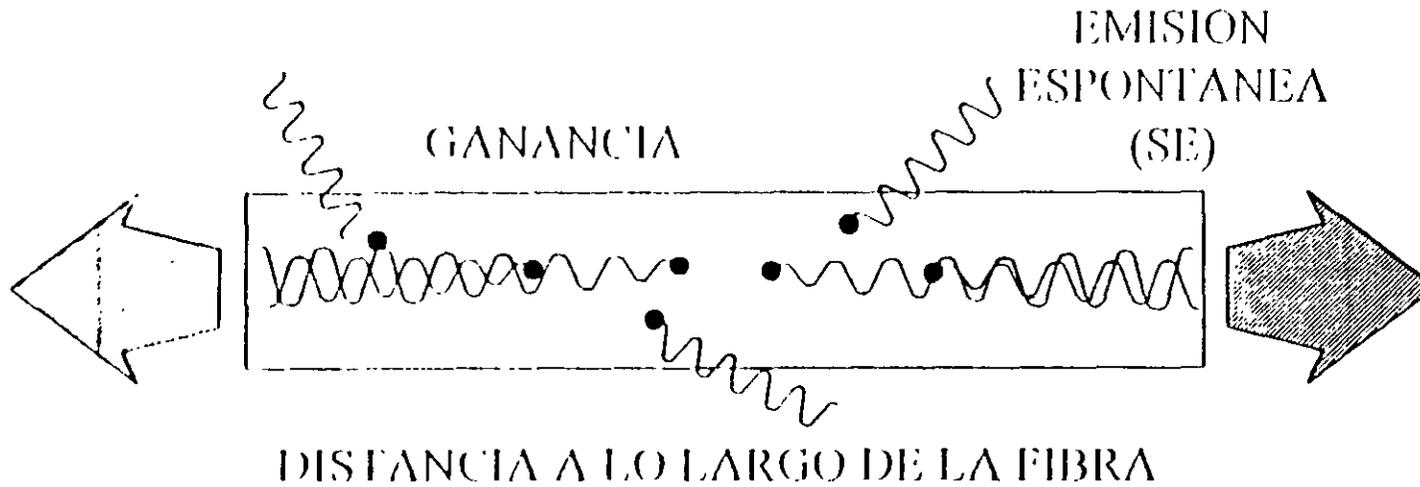
CURVA DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR



AMPLIFICADOR DE FIBRA BOMBEADO A 980 nm



RUIDO DEL AMPLIFICADOR OPTICO



- ASE : Emisión espontánea amplificada

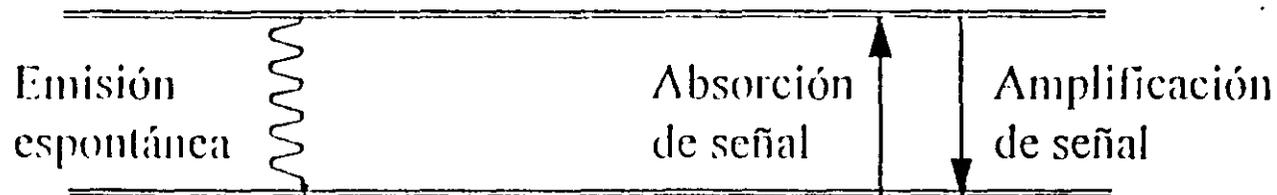


FIGURA DE RUIDO DEL AMPLIFICADOR OPTICO

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

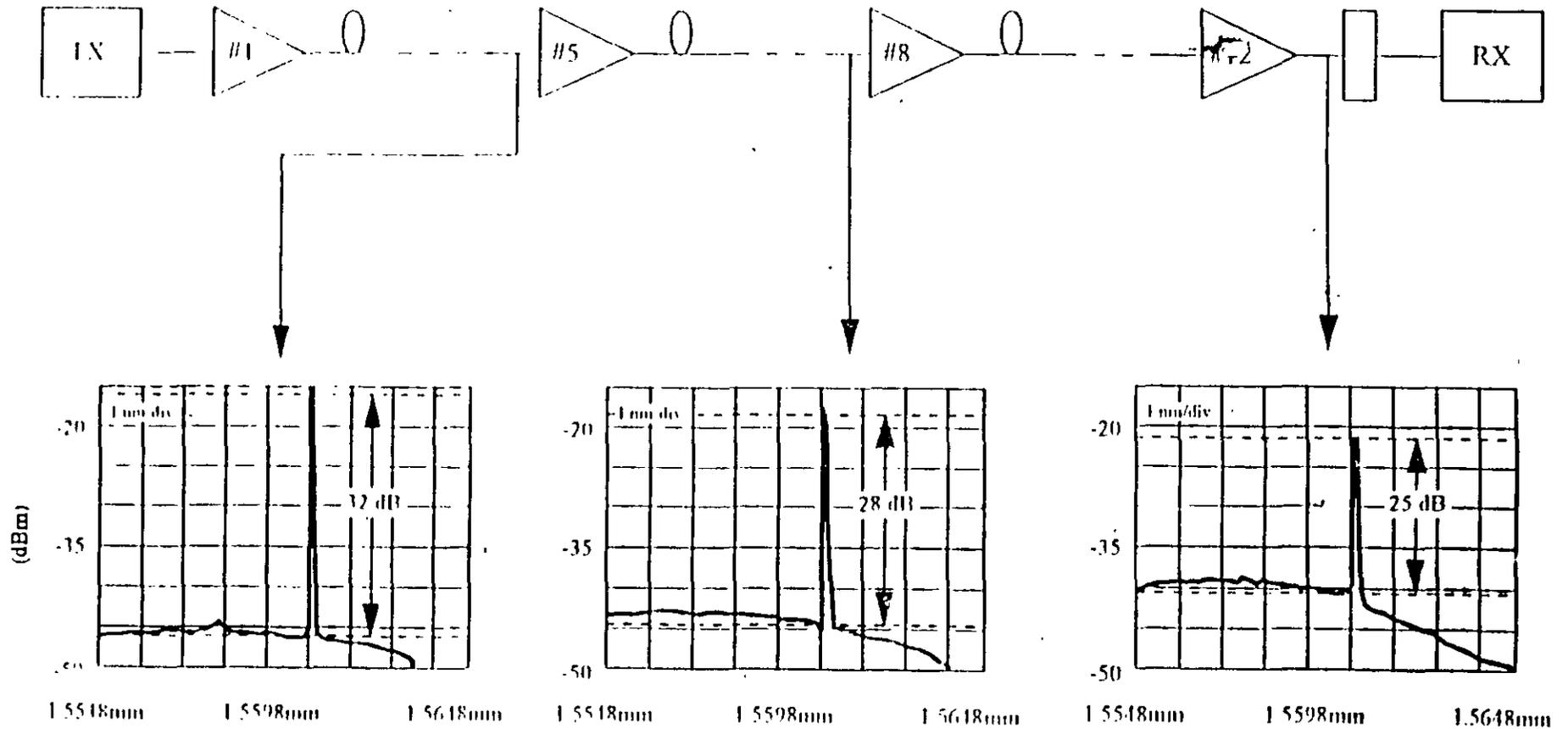
SNR_{1/0}: Relación señal a ruido (in / out).

Señal: Número de fotones promedio.

Ruido: Fluctuación del número de fotones.

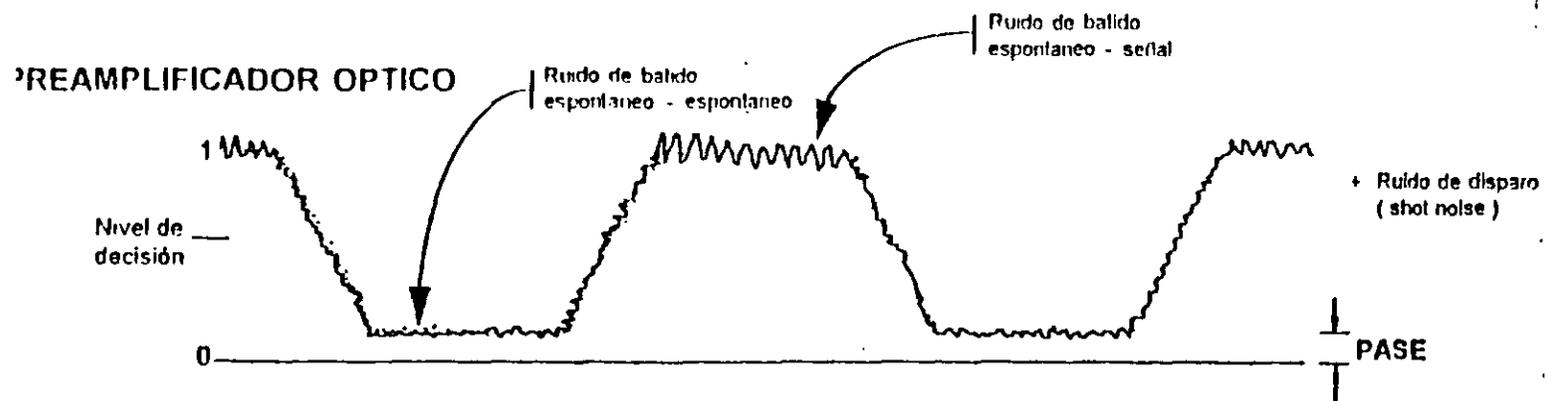
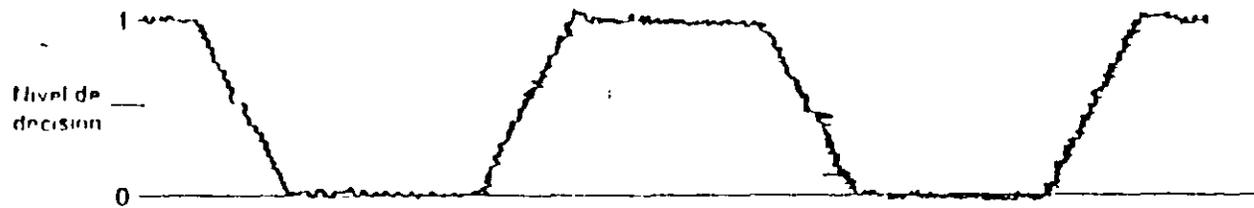
λ_p (nm)	NF (dB)
980	3
1480	4.2

ACUMULACION DE RUIDO EN UNA CADENA DE EDFAs



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

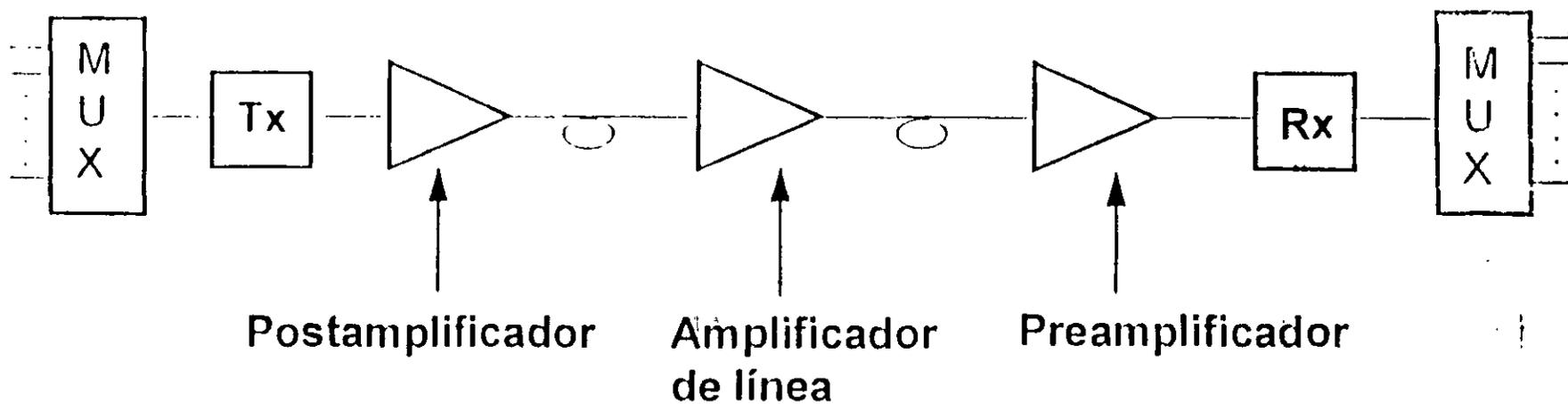
RUIDO EN EL RECEPTOR



BASE: Deteción de Señal

AMPLIFICADORES OPTICOS : PARTE II

DIFERENTES APLICACIONES DE AMPLIFICADORES OPTICOS

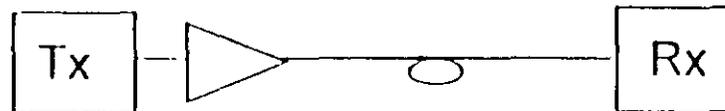


CONFIGURACIONES EDFA EN SISTEMAS SIN REPETIDORES

Sistema Convencional



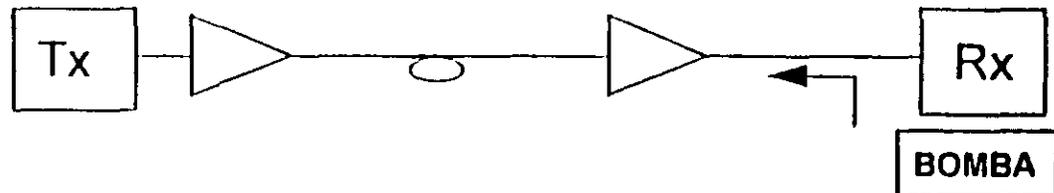
Postamplificador



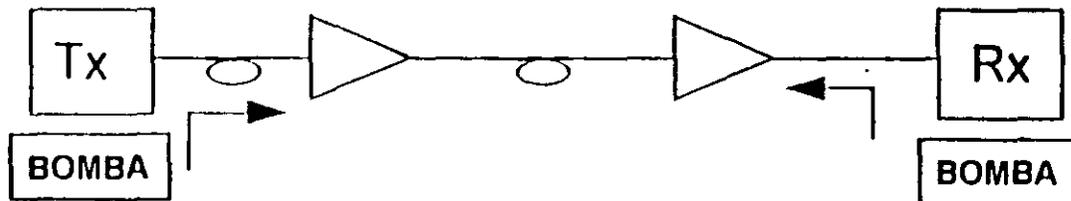
Postamplificador + Preamplificador



Postamplificador + Preamplificador
bombeo remoto

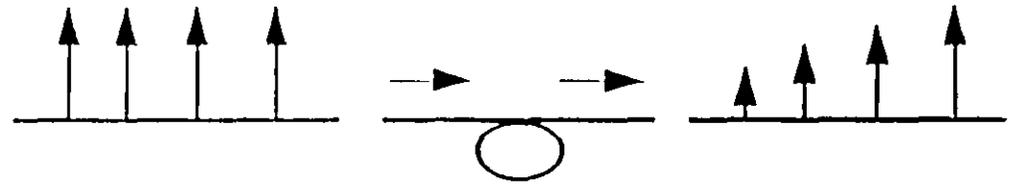


Postamplificador + Preamplificador
bombeo remoto bombeo remoto



EFFECTOS NO LINEALES

- DISPERSION RAMAN ESTIMULADA



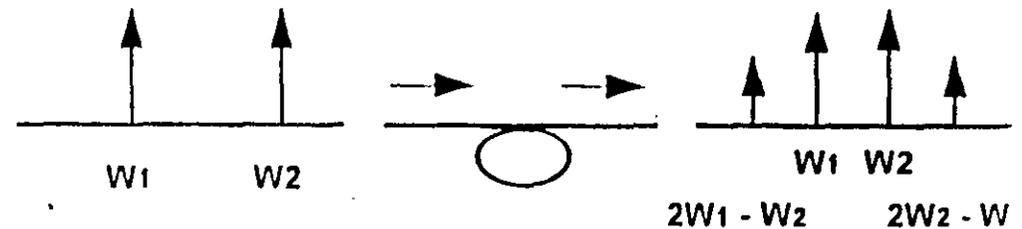
- DISPERSION BRILLOUIN ESTIMULADA

- AUTOMODULACION DE FASE

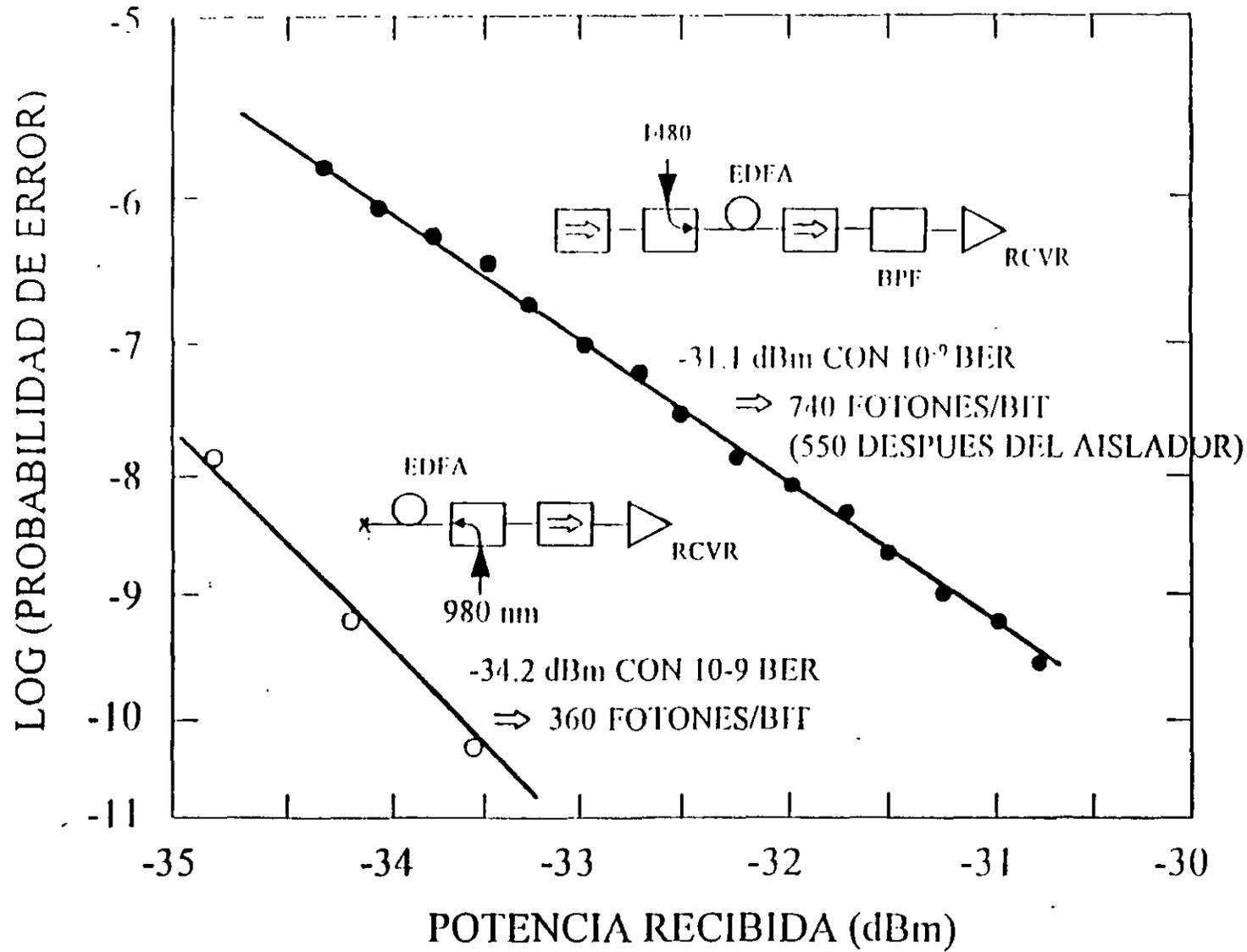


- MODULACION CRUZADA DE FASE

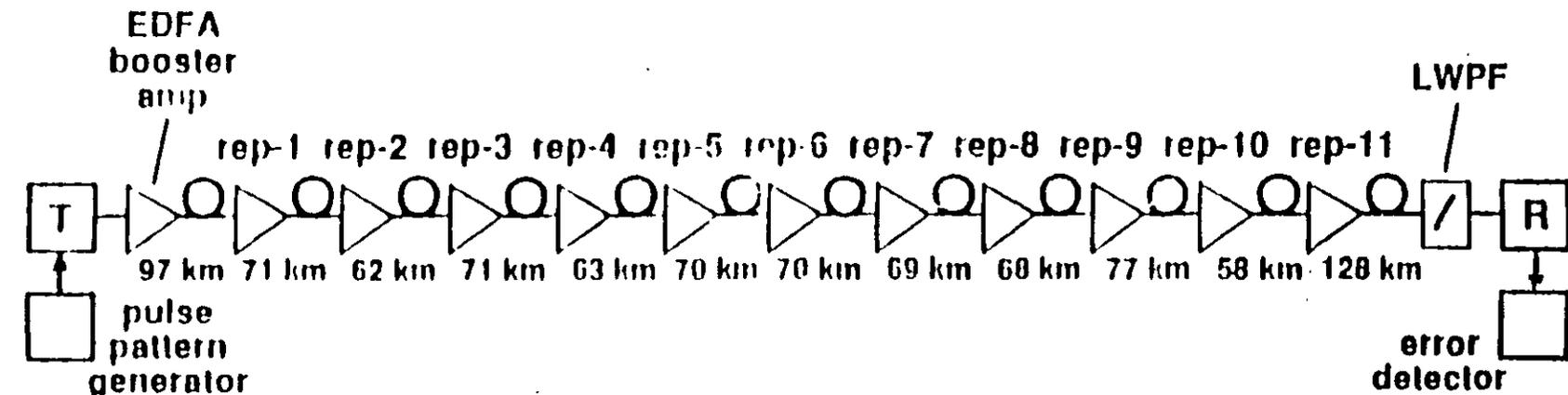
- MEZCLADO DE 4 ONDAS



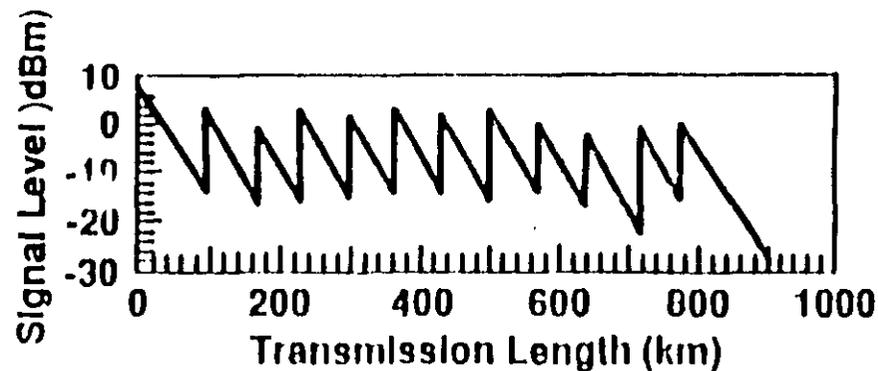
PREAMPLIFICADORES BOMBEADOS CON 980 nm VS 1480 nm A 8Gb/s



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

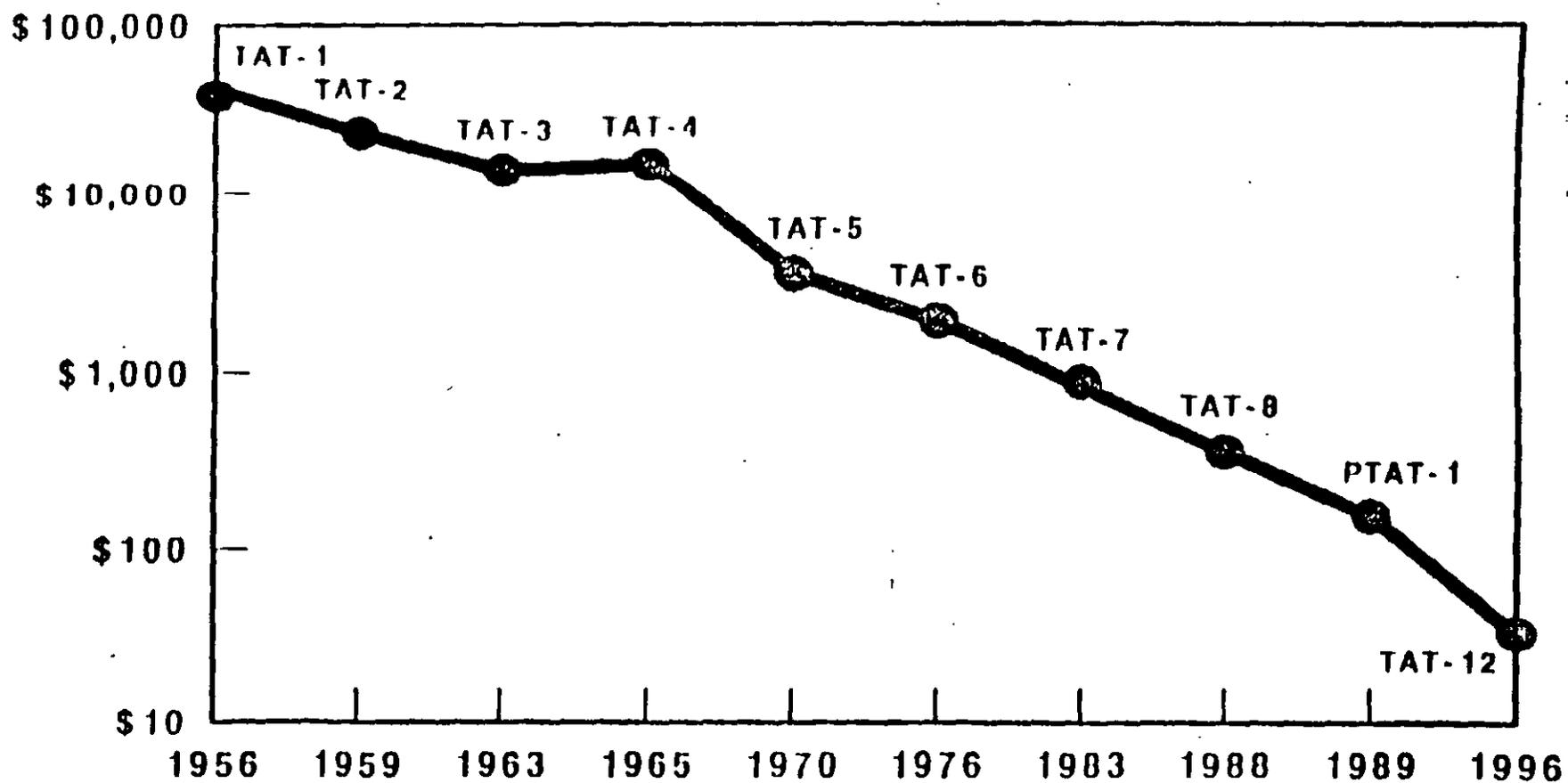


1.2 Gbit/s
ASK-NRZ

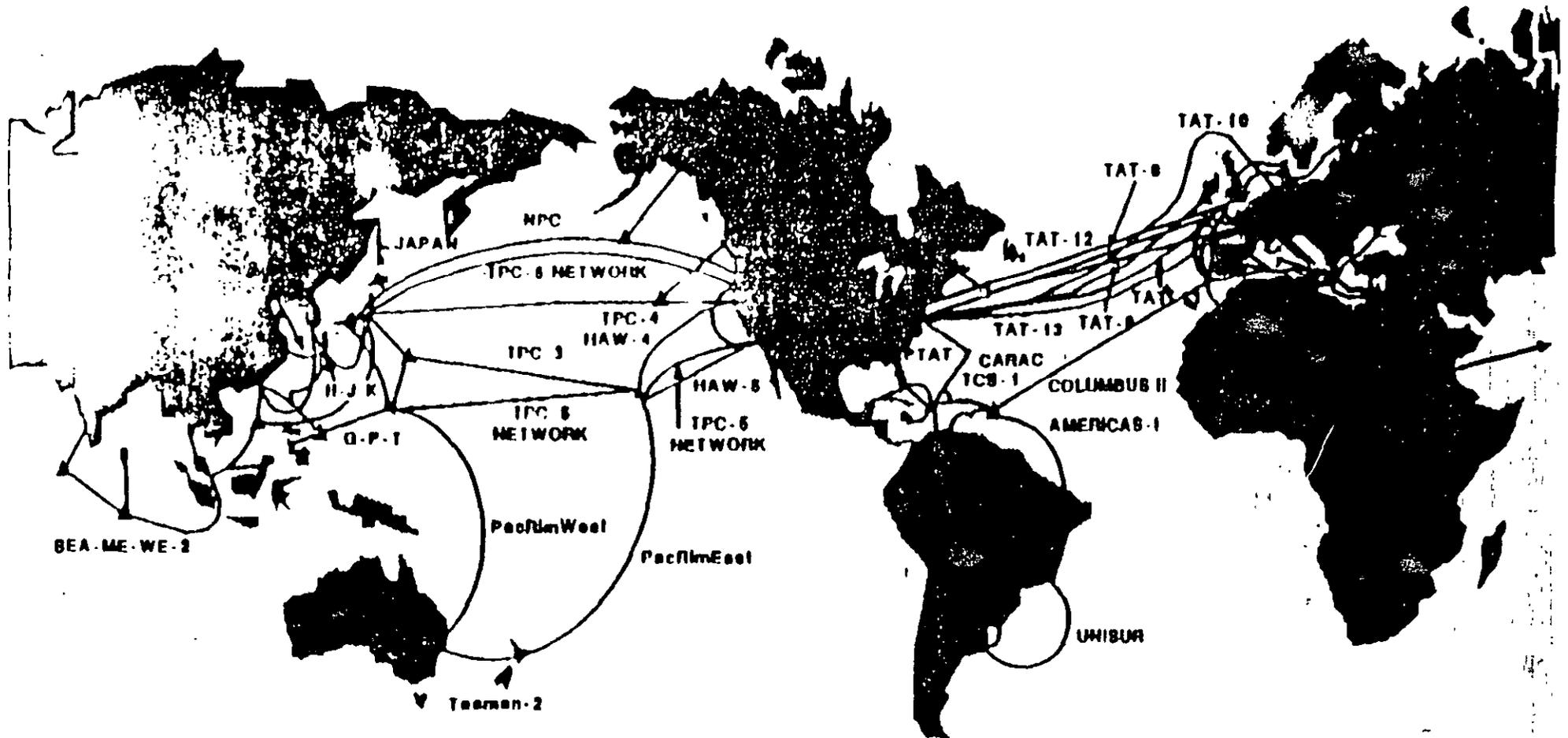


10^{-9} BER:
 $P_{rec.} = -33$ dBm
 Penalty @ 904 km:
 ~-0.6 dB

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

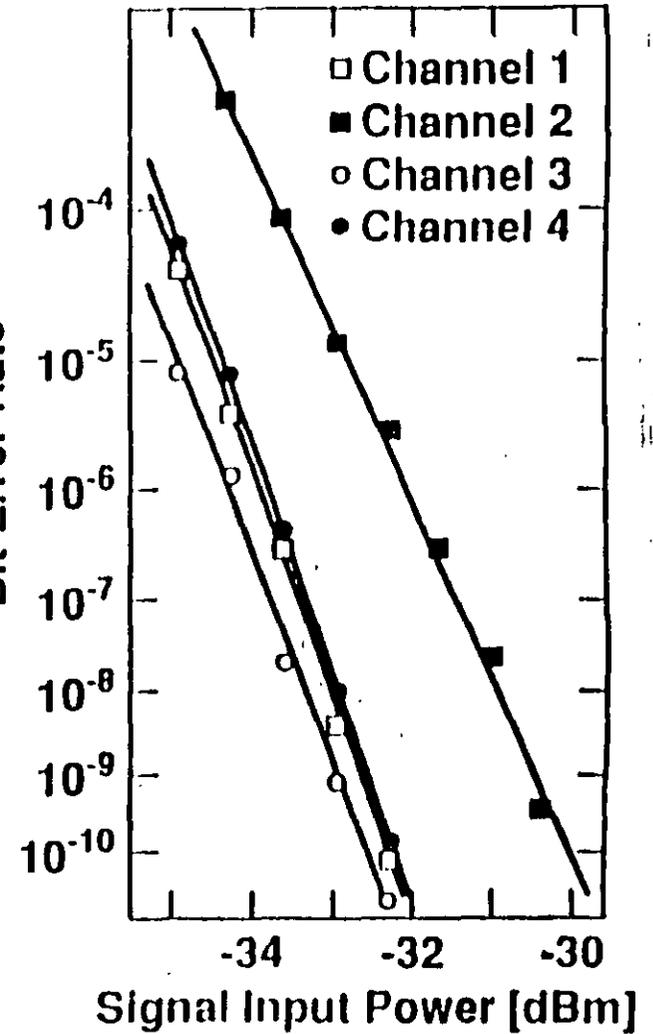
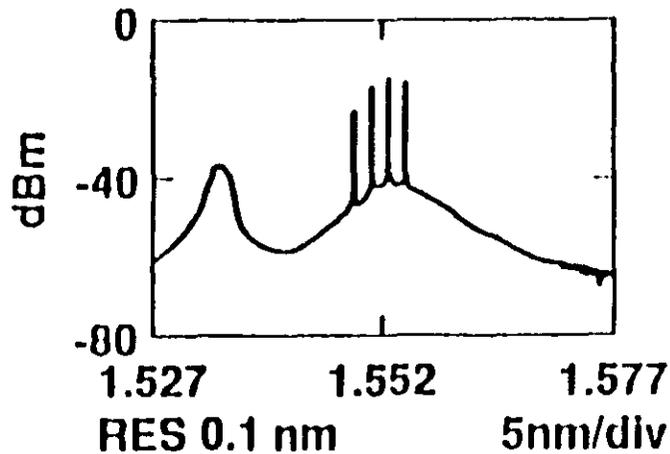
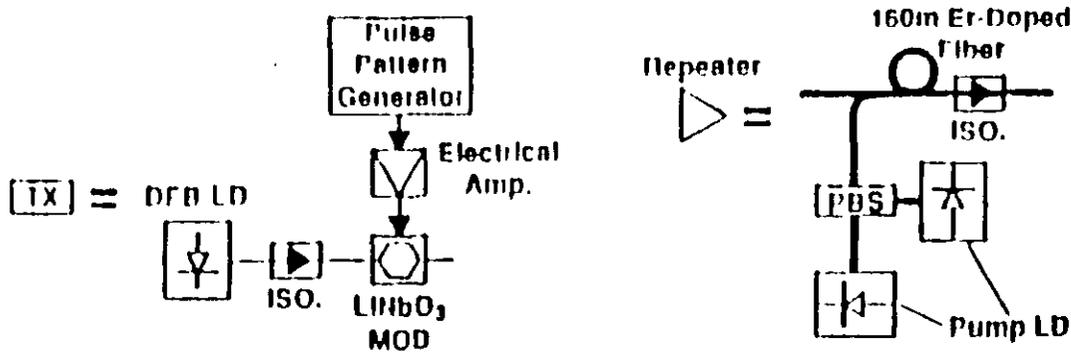
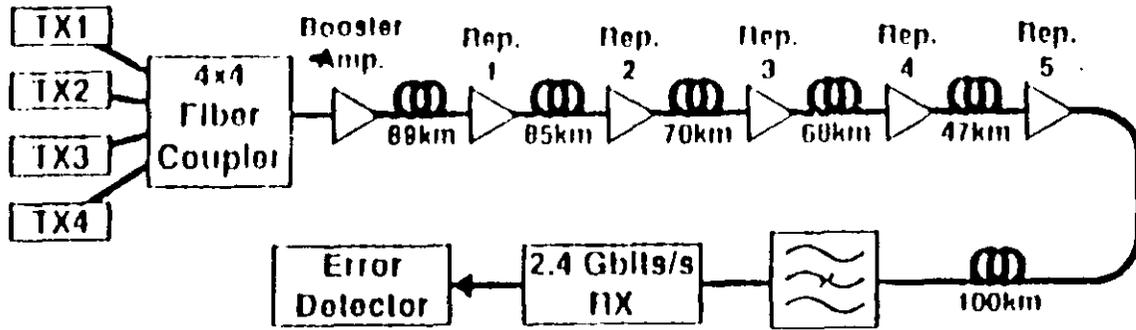
Ganancia fibra a fibra con una potencia de entrada de - 30 dBm	: 25 dB
Longitud de onda de operación	: (1530 - 1560) nm
Figura de ruido	: < 6 dB
Cambio de potencia de salida debido a polarización	: < 0.5 dB
Número de lasers de bombeo	: 1
Longitud de onda de bombeo	: (975 - 985) nm
Niveles máximos de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

CARACTERISTICAS DE LOS EDEFA'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

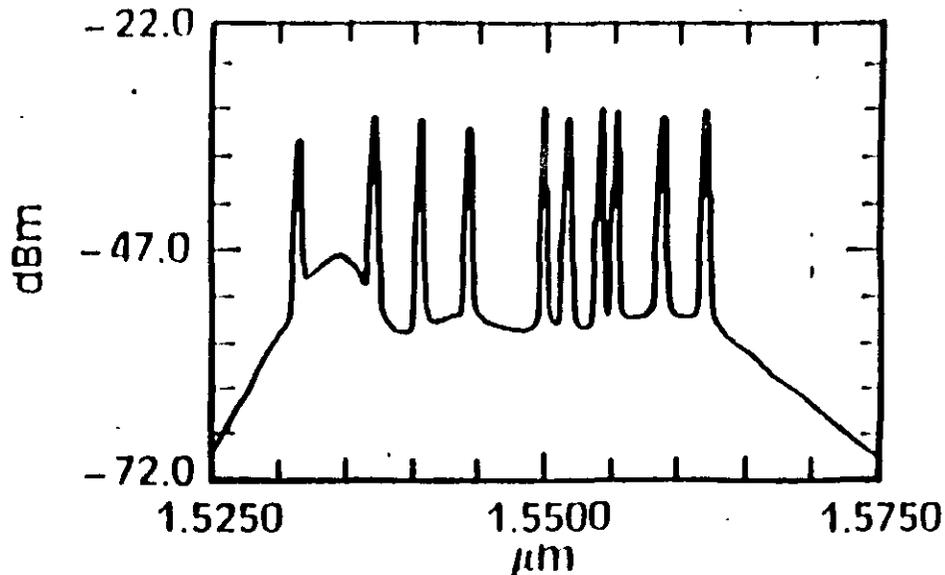
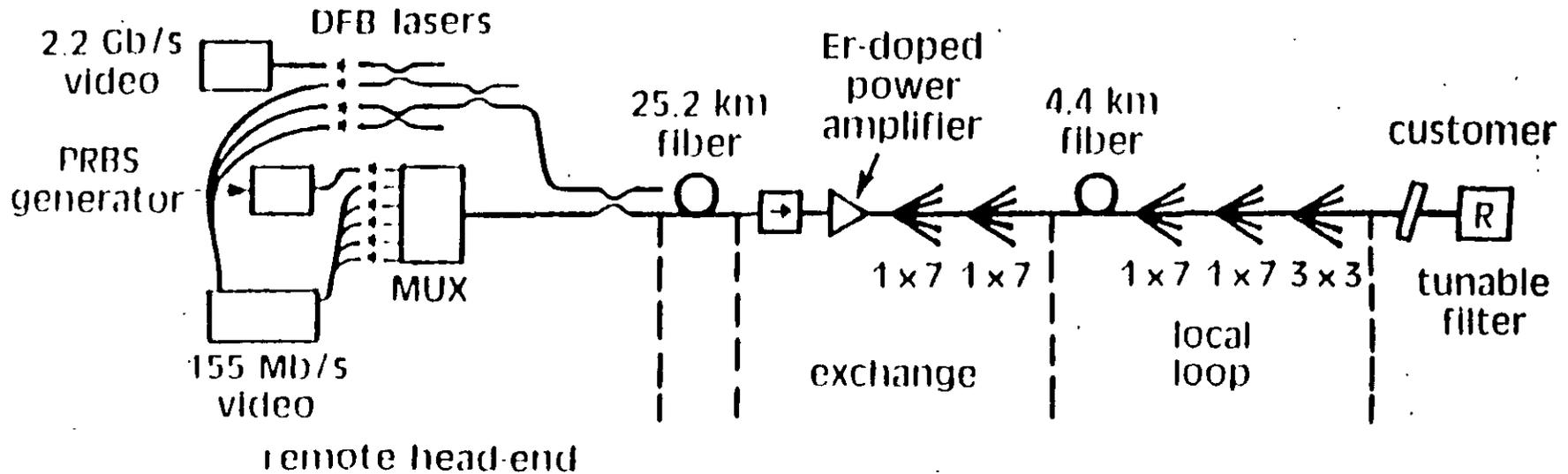


after Taga et al. OFC '90

TRANSMISIÓN POR SOLITONES

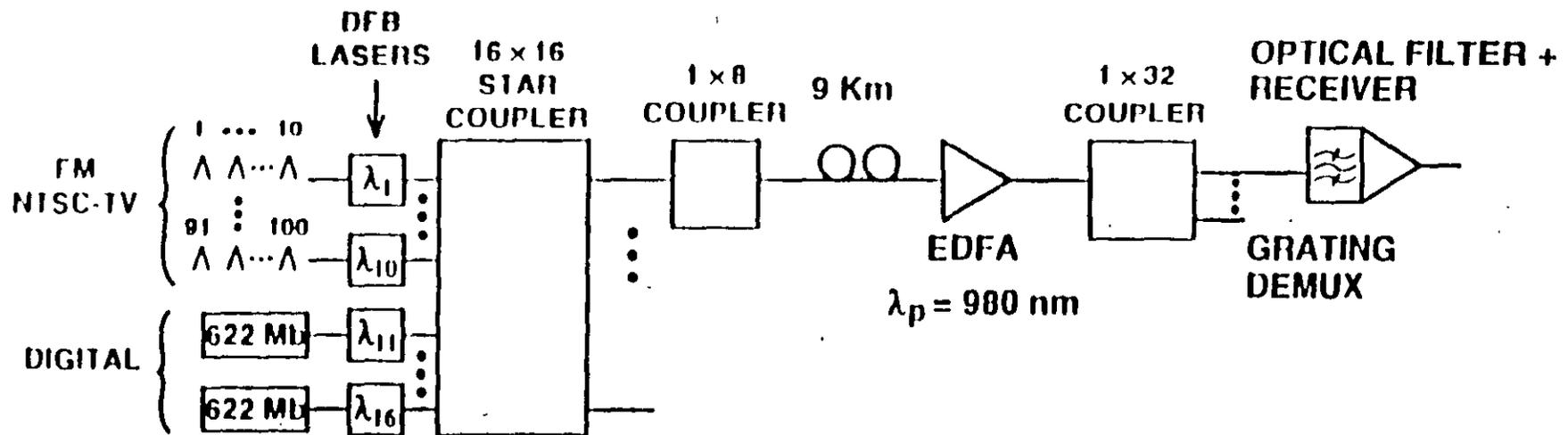
- Un solitón es un pulso que se propaga sin distorsión (ideal para comunicaciones).
- Efecto Kerr: Cuando la intensidad de luz excede cierto nivel, ondas de luz de la misma longitud de onda pero diferente intensidad viajan a diferentes velocidades.
- El efecto Kerr compensa la dispersión.
- El EDFA compensa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

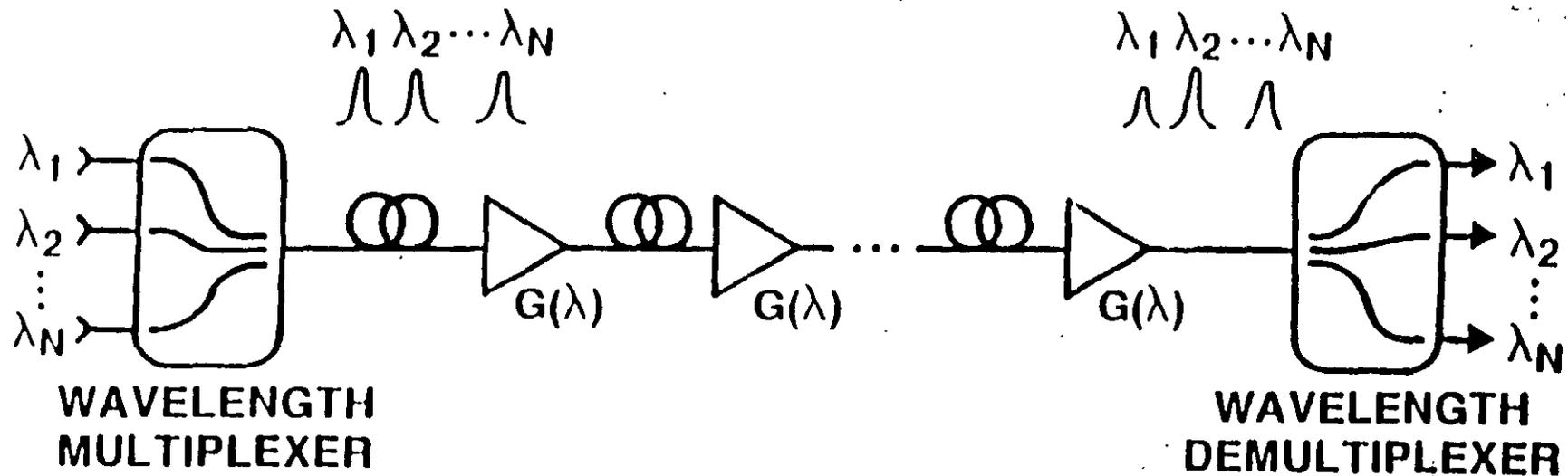
- Implantación de los sistemas de transmisión WDM de alta capacidad del futuro.
- La utilización de las fibras de dispersión corridas son amplificadores EDFA. Presenta una limitación de desempeño.
- El nuevo diseño de fibra óptica minimiza el problema.
- Efecto responsable: mezclado de 4 ondas. (4WM: FOURWAVE MIXING). Produce interferencia entre señales WDM e incrementa la tasa de errores.
- Solución: Introducción de una pequeña cantidad de dispersión cromática ($2 \text{ ps}/(\text{nm}^* \text{Km})$). 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 INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III
TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS**

TEMA

APLICACIONES ALTERNATIVAS DE FIBRA ÓPTICA

**EXPOSITOR: DR. VLADIMIR A. SVIRID
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

7. APLICACIONES ALTERNATIVAS DE FIBRAS ÓPTICAS

Las fibras ópticas son las más consideradas como el medio de transmisión de señales informativas en los sistemas de comunicaciones ópticas. Pero desde hace tiempo, cuando las fibras ópticas llegaron al mundo, éstas han utilizando como **transductores o sensores** para la detección de varias influencias externas (factores físicos y químicos).

Ahora, los sensores de fibras ópticas tienen muchas aplicaciones en varias ramas de la industria, ciencia, medicina, etc.:

- control de procesos industriales;
- monitoreo y diagnóstico en Ingeniería;
- industria aérea, cósmica y marina;
- química, bioquímica, medicina.

Los sensores de fibra óptica se difunden tan ampliamente gracias a sus características extraordinarias. Las **ventajas** principales de los sensores basados en fibras ópticas comparados con otros sensores, son las siguientes:

- aislamiento galvánico completo;
- insensibilidad a las interferencias electromagnéticas;
- seguridad completa contra riesgos de fuego y explosión;
- alta resistencia a la corrosión química;
- baja conductividad térmica;
- dimensiones reducidas y flexibilidad.

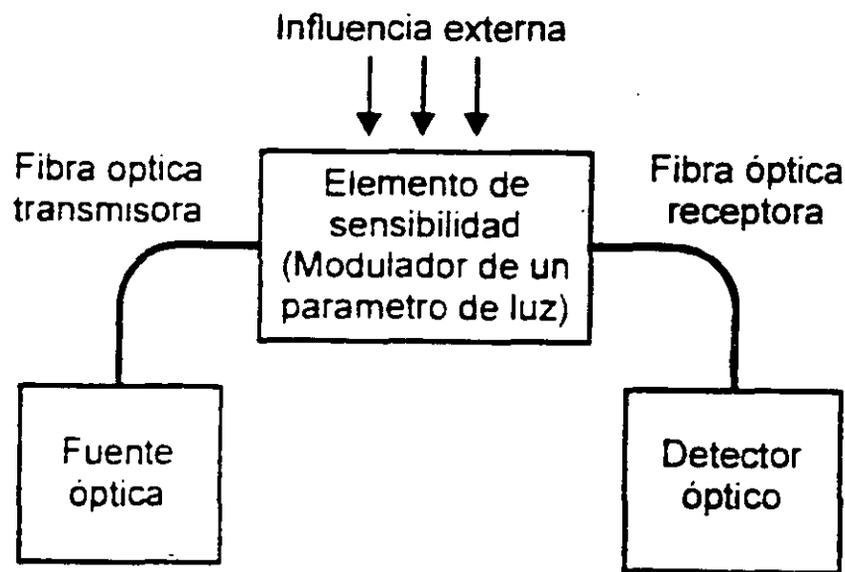


Figura 7.1. Estructura de un sensor de fibra óptica.

Generalmente, es posible modelar un sensor de fibra óptica de la manera como está representado en la Figura 7.1. Aquí el sensor incluye una fuente óptica, una fibra óptica transmisora, un elemento de sensibilidad (modulador de la luz guiada por la fibra óptica), una fibra óptica receptora y un detector óptico. El elemento de sensibilidad se puede hacer con una parte de la misma fibra óptica o con un elemento óptico sólo, enlazado a las fibras. Dentro de este elemento la luz guiada puede variar por causa de la influencia externa en algunos de sus parámetros fundamentales: su intensidad, fase, frecuencia (longitud de onda o color), plano de polarización. Existen muchas estructuras de sensores con modulación de cualquiera de los cuatro parámetros fundamentales de la luz.

La intensidad es el parámetro al que todos los receptores ópticos responden finalmente. La medida de intensidad óptica con un rango dinámico ancho y con una precisión estable es muy difícil. Primero, es difícil bajo la condición de rango dinámico ancho lograr la relación señal-ruido máxima teórica (con la predominación del ruido cuántico). Segundo, que la inestabilidad en la intensidad a largo plazo sea considerablemente mayor que éste valor de ruido cuántico.

Los sensores de intensidad típicos (Figura 7.2.a) responden a la posición de una máscara que varía la abertura y a su vez la transmisión a través de un sensor extrínseco, o a la posición de un espejo móvil que refleja la luz hacia atrás en una fibra (Figura 7.2.b). Dichos sensores generalmente tienen estabilidad relativamente pobre, 0.1%. La medida de intensidad óptica puede realizarse simplemente como la medida comparativa (Figura 7.2.c) en lugar de medida absoluta. Pero en la práctica es muy difícil realizar una buena señal de referencia que pueda compensar todas variaciones parasitas de la señal de medida.

La detección de la fase óptica por medio de un interferómetro es una de las maneras más sensibles para medir factores físicos. Por ejemplo, el giroscopio de fibra óptica es un medidor de rotación muy sensible. Con él pueden descubrirse las vueltas de valores menores de un microradian con dificultad moderada. La fase óptica en fibras tiene una relación significativa con la rotación de $0.05 \text{ rad}/(\text{m}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{s})$, temperatura de $10 \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{grad})$ y presión de $10 \text{ rad}/(\text{m} \cdot \text{bar})$. Los sensores interferométricos son normalmente intrínsecos con una fibra larga para lograr alta sensibilidad. Debe apreciarse claramente que las medidas de la fase son medidas normalmente indirectas de otro parámetro. Típicamente, este es el retardo diferencial de tiempo entre dos caminos en un interferómetro; por esto, la longitud de onda de la fuente y el índice de refracción refractivo del medio a través del cual la luz se está propagando, aparecerán en las relaciones de fase-retardo finales. En la Figura 7.3 están mostrados los esquemas básicos de los sensores interferométricos.

La detección de la polarización en la práctica, es muy similar a la interferometría que se usa para la medición de la fase óptica. La luz se propaga a lo largo de dos ejes principales de un medio de retraso birrefringente que puede ser una fibra o un cristal con intensidades iguales en cada eje y se detecta usando un analizador de polarización. La señal obtenida por este analizador se comporta exactamente como la señal obtenida por un interferómetro y depende del desfaseamiento entre dos ejes principales del medio birrefringente.

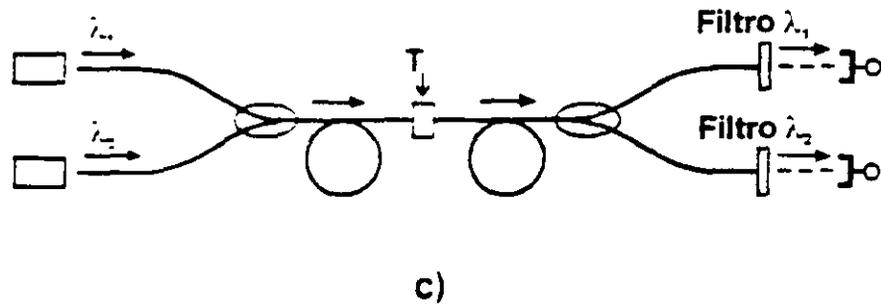
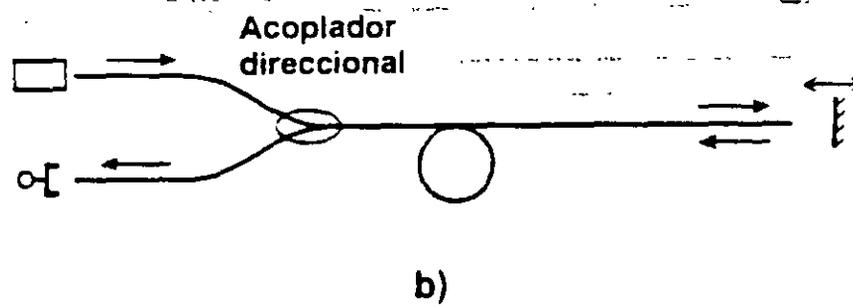
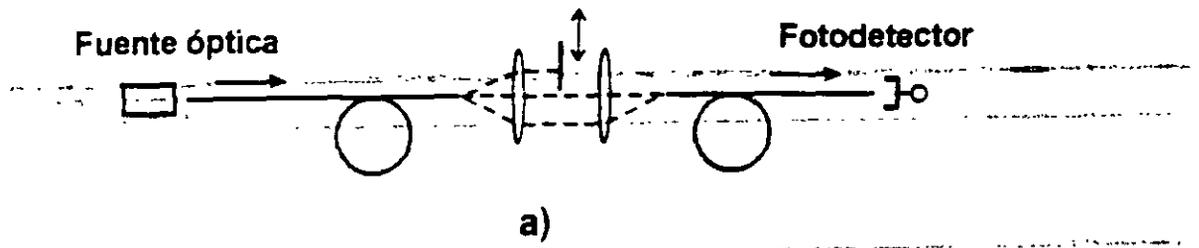


Figura 7.2. Esquemas básicos de los sensores de intensidad en fibra óptica:
 de desplazamiento de la máscara (a),
 de desplazamiento del espejo (b),
 de temperatura por absorción en semiconductor (c).

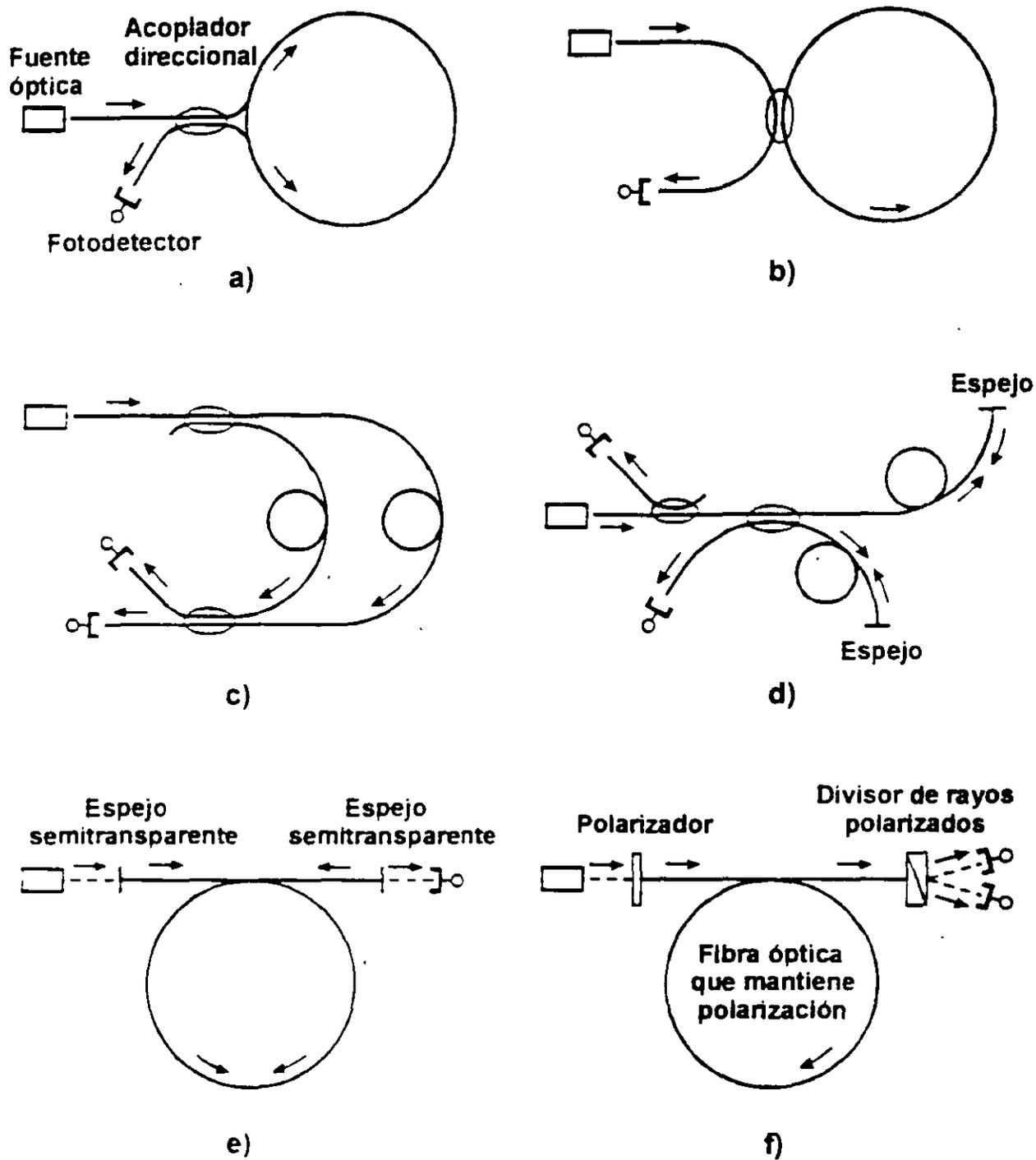
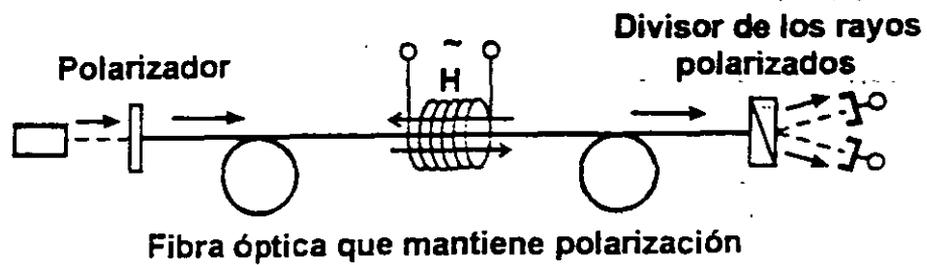
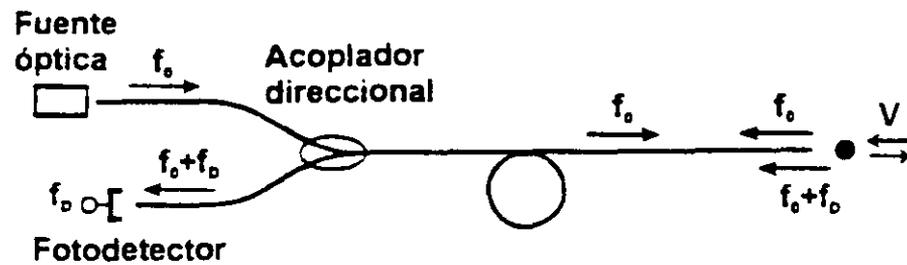


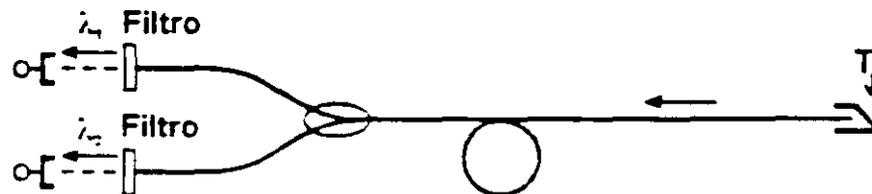
Figura 7.3. Esquemas básicos de los interferómetros en fibra óptica: circular de Sagnac (a), circular de Fabry-Perot (b), de Mach-Zehnder (c), de Michelson (d), de Fabry-Perot (e), con modos polarizados (f).



a)



b)



c)

Figura 7.4. Esquemas básicos de los sensores con la modulación de varios parámetros de la luz en fibra óptica:

Polarización; sensor de campo magnético por efecto de Faraday (a),
 Frecuencia; sensor de velocidad por efecto de Doppler (b),
 Color; sensor de temperatura - pirómetro de radiación (c).

Los sensores típicos de polarización son sensores del campo magnético o la corriente eléctrica basados en el efecto de Faraday (Figura 7.4.a).

En el caso de los dispositivos de fibra donde puede usarse fibras birrefringentes, la sensibilidad a temperatura o presión es típicamente a dos órdenes de magnitud debajo de ésta de un interferómetro directo. Cuando se usan cristales birrefringentes como el elemento de sensibilidad, la respuesta depende de las características del cristal. Se han producido transductores de presión muy acertados basados en la birrefringencia del cuarzo, aunque éstos son sólo útiles a presiones muy altas. Además, algunos tipos de resinas epoxy pueden elaborarse con las propiedades de birrefringencia muy sensibles. Sin embargo, estas sustancias son muy sensibles a la temperatura y son susceptibles a las variaciones debido a la absorción de humedad.

El traslado de frecuencia óptica por efecto de Doppler es un medio para la determinación inequívoca de velocidad de los objetos sólidos, partículas, flujos de líquidos y gases. El traslado de Doppler es típicamente del orden de $1 \text{ Hz}/(\mu\text{m}\cdot\text{s})$. En varios sistemas comerciales para detección del traslado de Doppler se usa el mezclamiento diferencial entre la luz reflejada del extremo de una sonda de fibra y la luz reflejada del objeto o volumen controlado (Figura 7.4.b).

El color es una función útil para detectar las variaciones en la intensidad de los componentes espectrales de la luz pasada por un elemento de sensibilidad. Sin embargo, la aplicación más exitosa del color ha estado en el uso de la luminiscencia sensible a la temperatura de los luminóforos de tierras raras excitados ópticamente, los semiconductores de banda directa y los materiales similares. Aquí se requiere el conocimiento sobre la variación de intensidad con longitud de onda. La detección aproximadamente correcta es simple para las variaciones pequeñas a longitudes de onda que se espacian estrechamente, pero se requiere la corrección compleja en el sistema de detección para las grandes variaciones en los sensores que usan luz en la banda ancha. Por ejemplo, el pirometro que detecta los cambios del espectro de radiación de objeto oscuro (Figura 7.4.c)

El tiempo de decaimiento (tiempo de luminosidad remanente) o más generalmente la modulación de la anchura del pulso, también puede usarse como una base para la medida. La mayoría de estos métodos cuentan con el decaimiento de luminóforos (sustancias luminiscentes) inorgánicos sensibles a la temperatura.

Los sistemas híbridos representan un camino a medias en el que se unen transductores convencionales y dispositivos electrónicos de bajo consumo ópticamente alimentados. La intensidad óptica de un diodo luminiscente es digitalmente modulada por la señal de salida del transductor convencional. Ya se encuentran disponibles varias versiones comerciales de tales sistemas.

El elemento de sensibilidad de un sensor de fibra óptica es un medio donde la luz guiada dentro de una fibra óptica puede modificar sus parámetros esenciales en relación con una influencia externa, física, química, bioquímica, etc. La luz de una fuente óptica cuyas propiedades ópticas pertinentes permanecen constantes, se lanza

en una fibra por medio de un mecanismo de acoplamiento estable y se guía al punto en el que la medida tiene lugar – un elemento de sensibilidad. En este punto la luz puede permitirse salir de la fibra y puede modularse en una zona separada antes de regresar en la misma fibra transmisora o en otra fibra diferente (fibra receptora). En este caso el sensor se llama **sensor extrínseco**. En otro caso, cuando la luz puede continuar propagándose dentro de la fibra y modulándose en relación con una influencia externa, el sensor es conocido como **sensor intrínseco**. Algunos sensores funcionan de tal manera que la luz guiada por la fibra óptica tiene el **campo evanescente** propagándose fuera de la fibra (en el medio externo). Es un caso medio pero en mayoría se clasifica como un sensor extrínseco. Los conceptos básicos de esta clasificación se indican en la Figura 7.2.

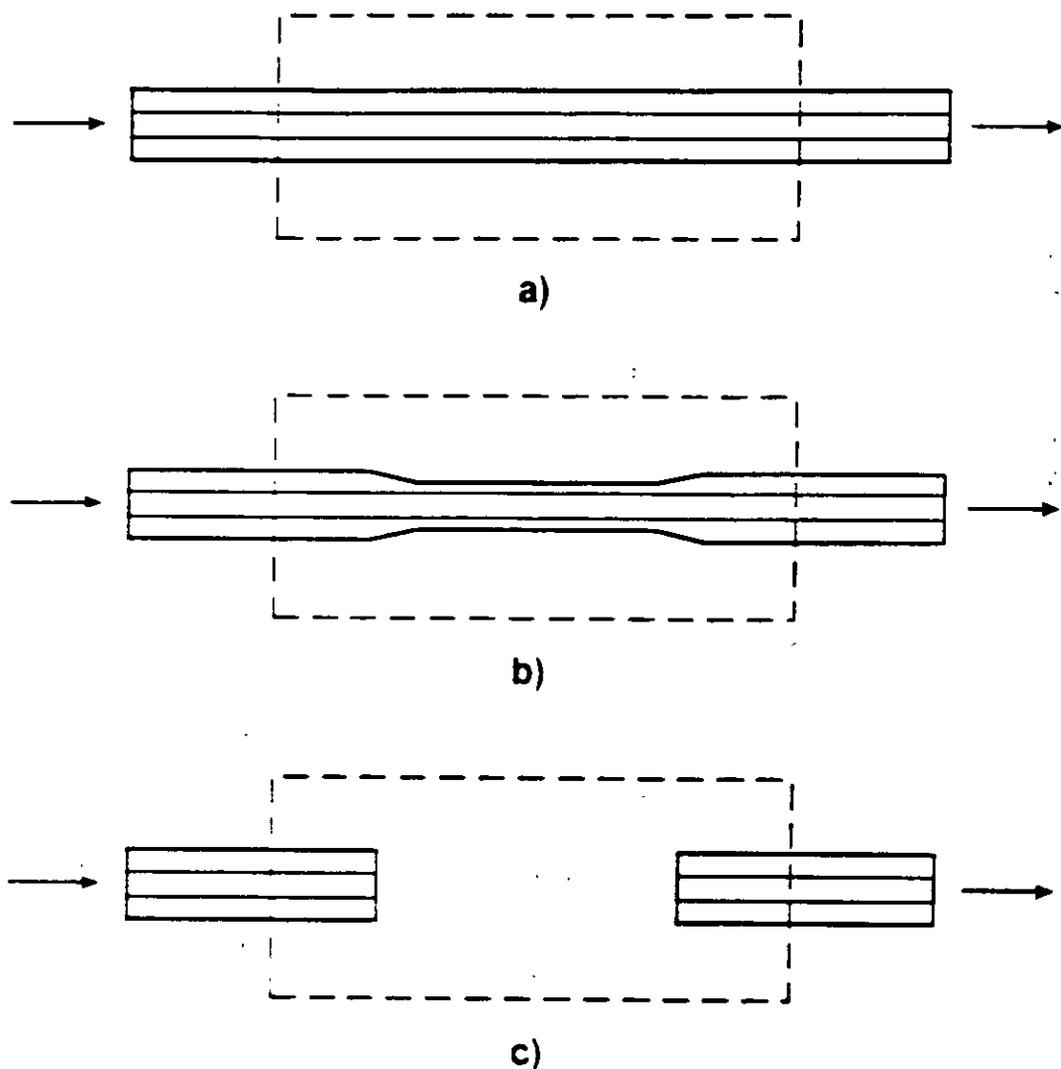


Figura 7.5. Elementos de sensibilidad de los sensores en fibra óptica: intrínseco (a), de campo evanescente (b), extrínseco (c).

En la mayoría de los sensores ópticos la señal de salida que se registra es la corriente del fotodetector. Por eso la función de transferencia del sensor en fibra óptica (SFO), suele representarse por medio de la proporción entre la corriente del fotodetector I_{fd} , por un lado, y la influencia exterior i , por el otro, que a su vez consiste de muchos factores (tanto el factor medido, como los efectos parásitos):

$$I_{fd}(i) = F_r T_v(i) C_r S_d$$

en donde F_r es un parámetro fundamental de la luz transmitido por la fuente óptica, $T_v(i)$ es el coeficiente de transmisión de la vía óptica (relación entre el valor del parámetro fundamental de la luz recibido en la entrada del convertidor F_r y el valor del mismo parámetro de luz transmitido en la salida de la fuente óptica F_t), C_r es el coeficiente de transformación del convertidor óptico (relación entre la potencia óptica recibida en la entrada del fotodetector P_r y el valor del parámetro fundamental de la luz recibido en la entrada del convertidor F_r) y S_d es la sensibilidad de corriente del fotodetector.

La vía óptica del SFO, es el esquema estructural representado en la Figura 7.6, se extiende desde la fuente óptica (1) hasta el receptor óptico (5).

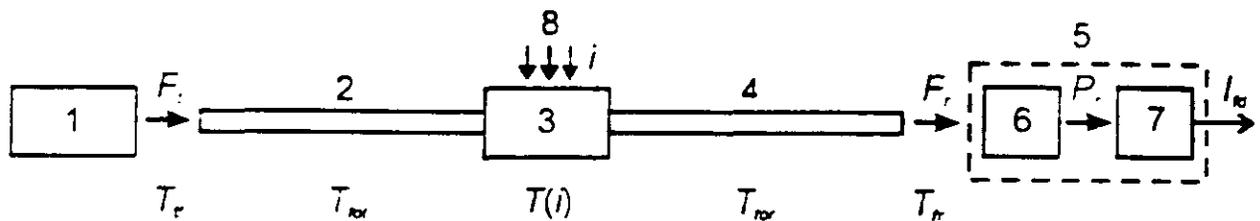


Figura 7.6. Esquema estructural de la vía óptica del sensor en fibra óptica: 1 es la fuente óptica; 2 es la fibra óptica transmisora; 3 es el elemento de sensibilidad; 4 es la fibra óptica receptora; 5 es el receptor óptico; 6 es el convertidor óptico; 7 es el fotodetector; 8 es la influencia externa.

Con las condiciones de que 1) el parámetro óptico F_t de la luz transmitido de la fuente óptica sea estable. 2) la característica de transformación del convertidor óptico C_r y la característica intensidad-corriente del fotodetector S_d a lo largo de todo su intervalo dinámico sean lineales, la corriente del fotodetector I_{fd} sea proporcional al coeficiente de transmisión de la vía óptica $T_v(i)$. En ese caso, la función de transferencia del SFO puede determinarse por el sólo coeficiente de transmisión de la vía óptica

A su vez, ese coeficiente de transmisión de la vía óptica se define como

$$T_v(i) = T_r T_{tr} T(i) T_{tr} T_r$$

donde T_r es el coeficiente de transmisión de una parte de la vía óptica desde la fuente óptica hasta el extremo de entrada de la fibra óptica transmisora, T_{tr} es el coeficiente de transmisión de la fibra óptica transmisora, $T(i)$ es el coeficiente de transmisión del

elemento de sensibilidad, T_{tr} es el coeficiente de transmisión de la fibra óptica receptora y T_r es el coeficiente de transmisión de una parte de la vía óptica desde el extremo de salida de la fibra óptica receptora hasta el receptor óptico. En caso de que los coeficientes de transmisión T_{tr} , T_{tot} , T_{tr} y T_r sean constantes (no dependan de i), el coeficiente de transmisión de la vía óptica $T_v(i)$ se puede determinar, como función de la influencia externa i , por el sólo coeficiente de transmisión del elemento de sensibilidad $T(i)$.

El aspecto deseable de la función de transferencia depende de la designación del SFO en cada caso concreto de su aplicación. En los casos cuando es necesario medir el valor absoluto de la influencia externa en el intervalo determinado, es preferible aplicar el SFO con la función lineal de transferencia. Se nombrarán estos SFO como **analógicos**. En los casos, cuando es necesario detectar el cambio relativo (salto) de la influencia externa, es preferible aplicar el SFO con la función no lineal de transferencia, estos SFO se denominarán **discretos**. De tal modo el SFO analógico, debe tener la función de transferencia con un sector lineal en el intervalo asignado de influencia externa. El SFO discreto, debe tener la función de transferencia con el salto en la región que se encuentra entre dos valores de influencia externa, en los cuales está interesado el usuario.

En varios casos, el factor de influencia externa sufre una o varias transformaciones en el sensor, antes de afectar uno de los parámetros de luz mencionados. No es posible considerar en un tiempo corto todos los tipos de sensores. Como un ejemplo analizaremos más profundamente sólo un grupo de sensores – sensores refractométricos.

En la Figura 7.7 se muestra el diagrama de las transformaciones de los factores de influencia externa, que pueden tener lugar en los sensores refractométricos de fibra óptica donde los tipos más comunes son de intensidad y de interferómetro (de fase). Aquí se presentan los factores de influencia externa, características ópticas del elemento de sensibilidad y parámetros modulados de la luz. Para cada uno de los sensores presentados, un cierto factor de la influencia externa se transforma a una característica óptica del elemento de sensibilidad y después a un parámetro de la luz. Se ve, que el índice de refracción está conectado directa o indirectamente con muchos otros aspectos de influencia externa. El índice de refracción de un medio puede determinar varias características físicas, químicas o bioquímicas de este medio. Por esta razón, los sensores refractométricos pueden aplicarse para detectar varios tipos de influencia externa. Los sensores que utilizan el índice de refracción como el factor de la influencia externa se llaman sensores refractométricos. Los sensores refractométricos de interferómetro tienen más precisión en comparación con los sensores refractométricos de intensidad, pero por lo general, son estructuras más complejas y más costosas.

En el presente, las aplicaciones más comunes de los sensores refractométricos de amplitud de fibra óptica son medición de la concentración, de los tamaños y de la velocidad de las burbujas de gas en los líquidos; medición del nivel de líquidos y medición del índice de refracción

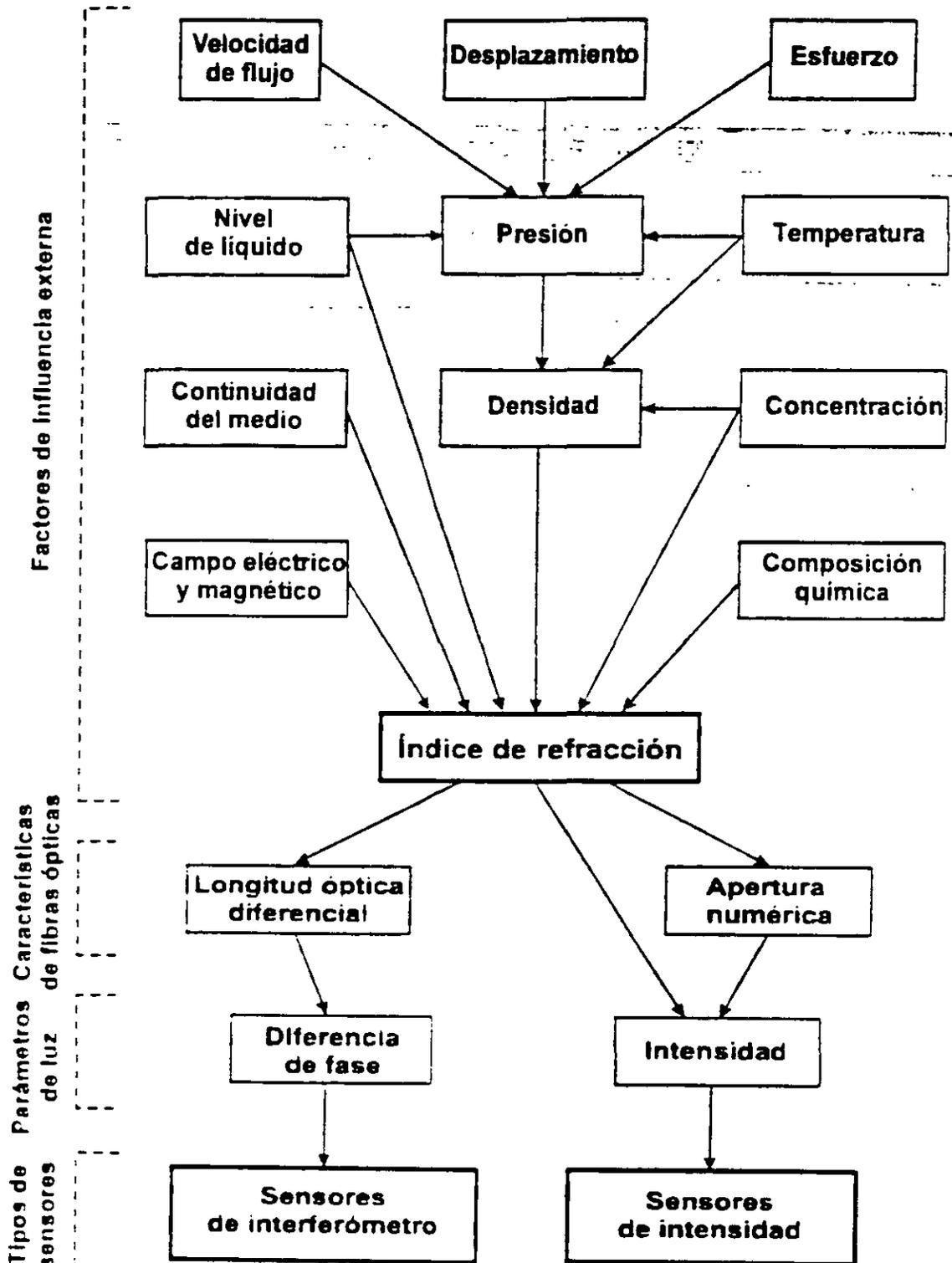


Figura 7.7. Transformaciones de los factores de influencia externa en los sensores refractométricos.

La transferencia del factor de influencia externa en uno de los parámetros de la luz se lleva a cabo en el elemento de sensibilidad del sensor. El elemento óptico aislado (un prisma, un cono, o una superficie de segundo orden), igual que una zona de la misma fibra óptica, se puede usar como el elemento de sensibilidad del sensor en fibra óptica. En el segundo caso, esta zona de la fibra óptica, con el propósito de amplificación de sensibilidad del sensor a la influencia externa, puede tener cualquier modificación de la regularidad de su estructura (una sección de la fibra sin cubierta, por cierta curvatura o adelgazamiento de la fibra). En la Figura 7.5 se muestran algunas variaciones de la construcción de los elementos de sensibilidad de los sensores refractométricos de amplitud en fibra óptica.

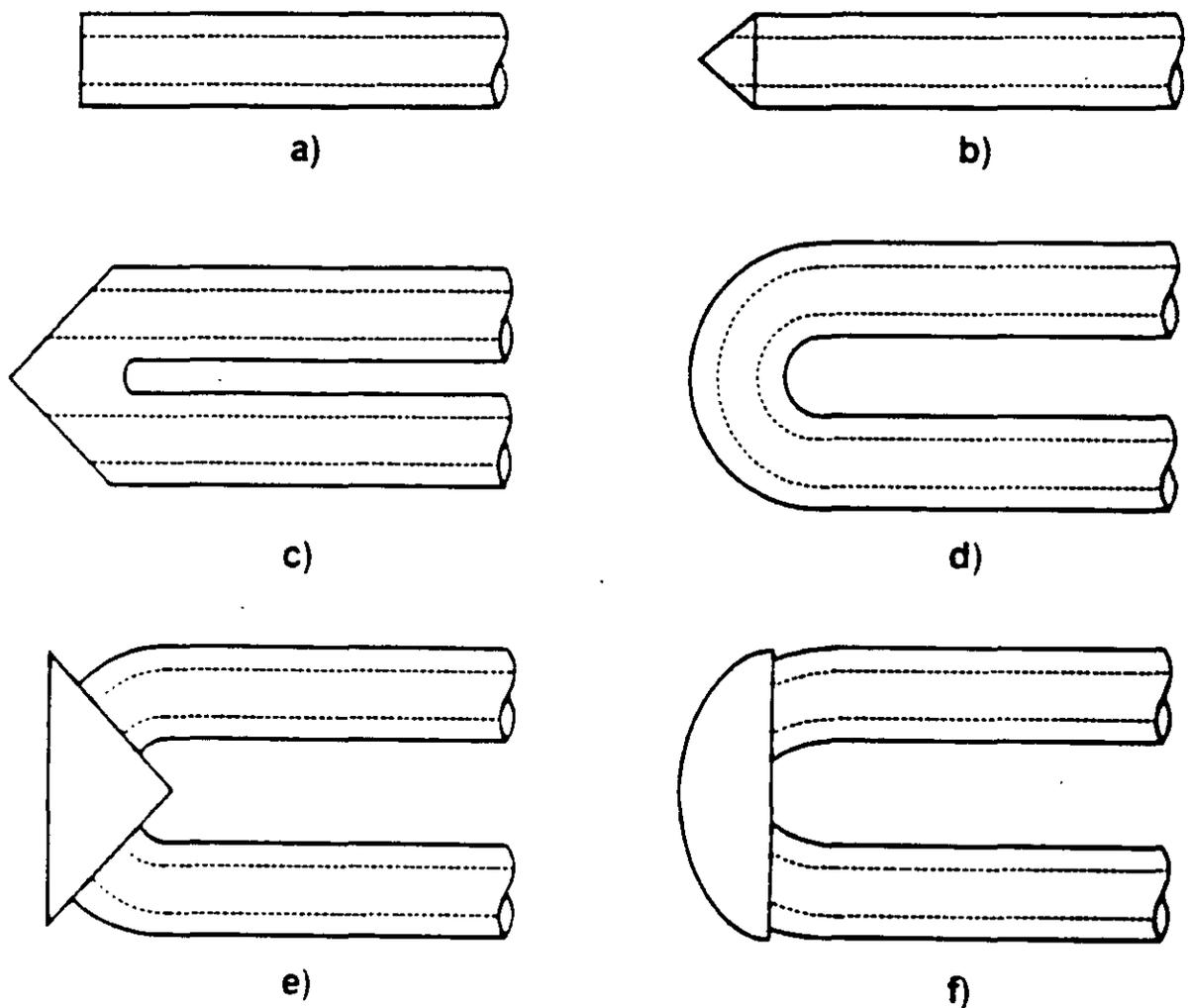


Figura 7.8. Elementos de sensibilidad de los sensores refractométricos de amplitud en fibra óptica: fibra óptica con extremo plano (a); fibra óptica con extremo cónico (b); dos fibras ópticas con extremos inclinados (c); fibra óptica con curvatura brusca (d); elemento prismático (e); elemento elipsoidal (f).



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

CURSOS ABIERTOS

II DIPLOMADO INTERNACIONAL EN TELECOMUNICACIONES

MODULO III TELECOMUNICACIONES VÍA FIBRAS ÓPTICAS

TEMA

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA

**EXPOSITOR: DR. FERNANDO MARTÍNEZ P.
PALACIO DE MINERÍA
JUNIO DEL 2002**

1. INTRODUCCION

1.1 Definición

¿Qué son las fibras ópticas?

Las *fibras para comunicación óptica* son filamentos largos y flexibles de pequeña sección transversal, comparable a la de un cabello humano, hechas de un vidrio altamente transparente y cuya función es confinar la luz infrarroja sobre grandes distancias.

En ocasiones, también es posible el uso de fibras de plástico para transportar luz visible sobre distancias cortas. La sección transversal de estas fibras es generalmente mayor que las de vidrio.

Las *fibras ópticas* ofrecen una forma elegante de combinar voz, imágenes y datos en un solo medio de alta capacidad.

La *fibra* consiste de un cilindro dieléctrico interno llamado núcleo rodeado de otro cilindro también dieléctrico llamado revestimiento más una cubierta que le sirve de protección mecánica y ambiental.

Como se explicará en detalle en este curso, el guiado de la luz es posible debido a la diferencia entre los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción está relacionado con la velocidad de propagación en el medio.

1.2 Desarrollo Histórico

El utilizar la luz como medio de comunicación no es una idea nueva.

Desde tiempos remotos el hombre ha utilizado diversos medios de comunicación óptica tales como señales de humo, faros, telégrafos ópticos, etc.

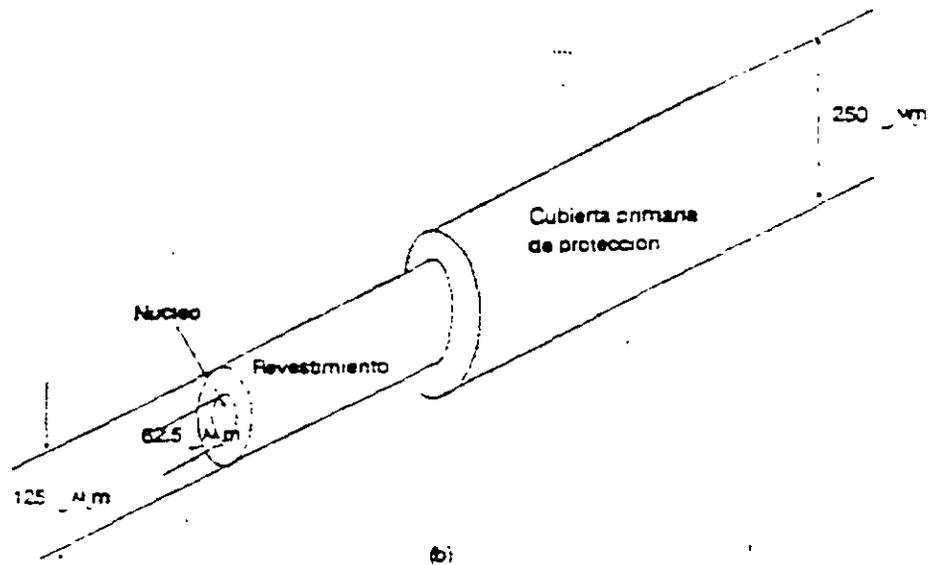
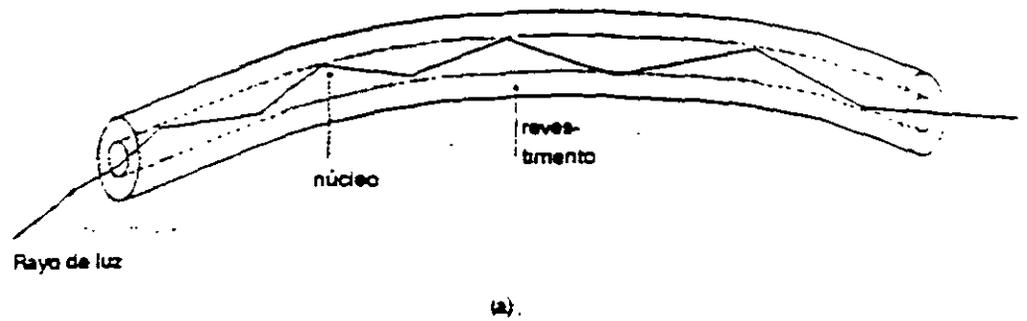


Figura 1.1
 (a) Funcion y (b) estructura con dimensiones típicas de una fibra óptica

La historia de las comunicaciones ópticas puede sintetizarse en la siguiente cronología:

- 1870 El físico inglés John Tyndal demostró que la luz puede guardarse en un chorro de agua.
- 1860 Alexander Graham Bell realizó el fonófono el cual transmitía sonico mediante la modulación de un rayo de luz del sol.
- 1920 Inveccion del fibroscopio de aplicacion de medicina.
- 1958 Artaur Schawlow y Charles Townes de Bell Laboratornes proponen el LASER.
- 1960 - - Demostración experimental del laser de rubí por Theodor Maiman.
- 1962 Descubrimiento del efecto laser en semiconductores.

- 1966 Charles Kao y George Hockham de Standard Telecommunications Laboratories en Inglaterra propusieron el uso de fibras ópticas de vidrio como medio de telecomunicación.
- 1970 La empresa Corning Glass Works de Estados Unidos fabricó la primera fibra óptica con una atenuación de 20 dB/km.
- 1976 Primer enlace de fibra óptica en la planta de Western Electric de Atlanta, U.S.A.

En gran medida, el uso de las fibras ópticas fue motivado debido a que la utilización de la atmósfera como medio de transmisión de la luz no es muy confiable. Elementos tales como la niebla, smog, lluvia y polvo atenúan grandemente la señal.

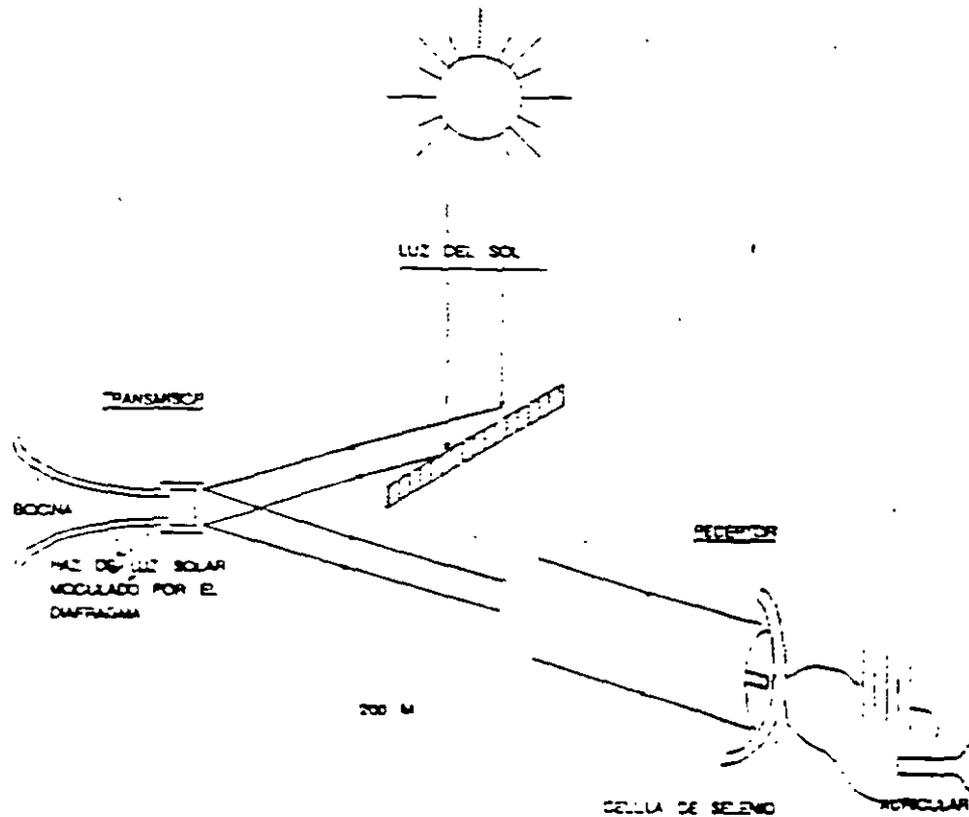


Figura 1.2
Esquema del fonógrafo de Alexander Graham Bell para la transmisión de sonido modulando luz del sol.

1.3 Descripción de un Sistema de Comunicación por Fibras Ópticas

En el lado transmisor se tiene:

- La señal analógica o digital que se desea transmitir.
- El fotoemisor: un LED o un Laser de semiconductor.
- El fotoemisor transforma la señal eléctrica en una señal óptica la cual es acopiada mediante un conector a un cable de fibra óptica

En el medio de transmisión se tiene:

- Conectores.
- Cable que contiene a las fibras ópticas las cuales conducen la señal luminosa del lado transmisor al lado receptor. Generalmente una fibra transmite en una dirección y otra fibra en la dirección contraria.
- Empalmes (si son necesarios).

En el lado receptor se tiene:

- El conector que acopla la señal óptica de la fibra al fotodetector.
- El fotodetector el cual realiza la conversión de la señal óptica en una señal eléctrica.
- Etapa o etapas de amplificación y en el caso de una señal digital de una etapa de regeneración.
- A la salida del receptor se recupera la señal con una cierta relación señal a ruido (transmisión analógica) ó con cierta probabilidad de error (transmisión digital).

1.4 Ventajas de las Comunicaciones por Fibra Óptica

GRAN ANCHO DE BANDA: Una estimación del ancho de banda potencial de la luz en la ventana de longitudes de onda utilizada actualmente en fibras ópticas es de 25 000 GHz · km.

TAMANO PEQUEÑO Y PESO REDUCIDO: las fibras ópticas tienen diámetros muy pequeños (su diámetro de 125 micras es similar al grosor de un cabello humano). El cable de fibra óptica aun con sus protecciones y envolventes es de El peso reducido del cable facilita grandemente su instalación.

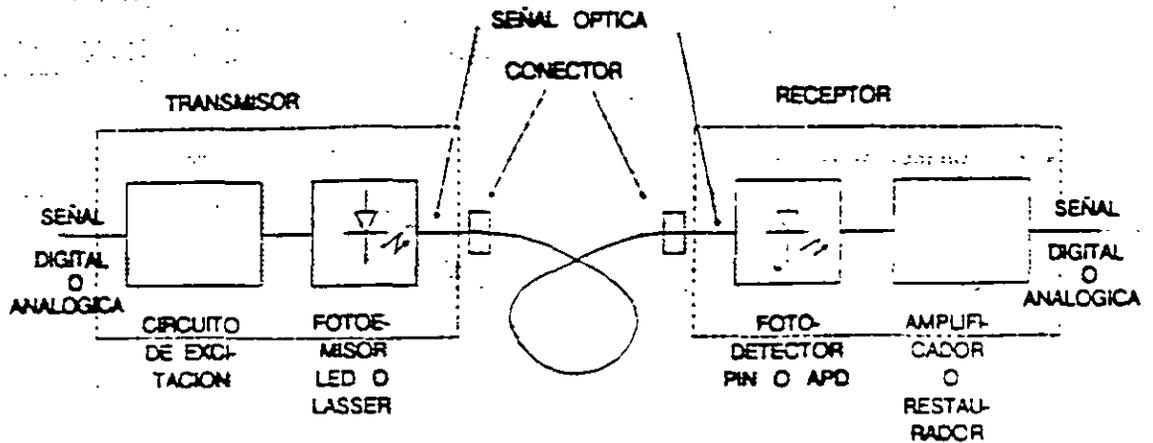


Figura 1.3
Elementos básicos de un sistema de comunicación por fibras ópticas

INMUNIDAD A LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA Y DIAFONÍA: Por constituir una guía de onda dieléctrica, las fibras ópticas están libres de interferencia electromagnética o de interferencia de radiofrecuencia. El sistema de comunicación no se afecta por transmisión en un ambiente ruidoso eléctricamente. La diafonía o cruce de señales es despreciable aún cuando muchas fibras se cableen juntas.

AISLAMIENTO ELÉCTRICO: Por su naturaleza dieléctrica, las fibras no presentan el problema de inducción de corriente o de shock eléctrico para el instalador u operador.

SEGURIDAD EN LA SEÑAL: Una señal óptica transmitida no puede obtenerse de una fibra de una manera no invasiva.

BAJA PERDIDA DE TRANSMISION: Dependiendo de la longitud de onda utilizada, la atenuación en fibras de vidrio va desde 3 dB hasta 0.2 dB en cada kilómetro.

ROBUSTEZ Y FLEXIBILIDAD: Con ayuda de las envolventes protectoras en cables opacos, se logra una gran resistencia a la tensión y a la compresión. Las fibras son naturalmente muy flexibles y los cables ópticos siguen en gran medida esta flexibilidad.

GRAN CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS: Los tiempos de vida de los componentes está en el orden de los 20 a 30 años.

POTENCIAL BAJO COSTO: El vidrio o dióxido de silicio se obtiene de la arena que es un material muy abundante.



Figura 1.4.
Comparación de un cable telefónico multipar, cable coaxial y cable óptico.

1.5 Aplicaciones de las Fibras Ópticas

Voz

- Troncales telefónicas:
 - Entre centrales
 - Entre ciudades
 - Transoceánicas
- Servicio al abonado:
 - Ciudad "fibradas"
 - Servicios de banca ancha
- Sistemas eléctricos de potencia:
 - En plantas y subestaciones
 - Comunicación entre subestaciones a lo largo de la línea de alta tensión
- Ferrocarriles:
 - A lo largo de las vías de trenes eléctricos

- Comunicaciones en campo

VIDEO

- Eventos en vivo
- Distribución de televisión por cable
- Vigilancia
- Monitoreo remoto
- Misiles guiados por fibra
- Ciudad "fibrada"

DATOS

- Computadoras:
 - Procesador a periféricos
 - Procesador a procesador
- Enlaces de datos entre oficinas
- Redes de Area Local (FDDI)
- Cableado de aviones, barcos e incluso automóviles (fibras de plástico)
- Estaciones satelitales

SENSORES

- Temperatura, presión, posición, vibración, voltaje, corriente, etc.

MEDICINA

- Endoscopia

2. FUNDAMENTOS DE PROPAGACION DE LA LUZ

2.1 Naturaleza de la Luz

La luz es una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio.

La onda luminosa es por lo tanto una onda transversal cuyo campo eléctrico y magnético oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación.

La velocidad de la luz en el vacío (y en el aire) c es aproximadamente:

$$c = 300\,000 \text{ km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La relación básica entre la frecuencia f , la longitud de onda λ y la velocidad de propagación c de una onda es:

$$c = f\lambda$$

La luz visible solamente ocupa una zona reducida del espectro electromagnético que va desde los 380 nm (violeta) hasta los 780 nm (rojo).

Se considera también como luz la zona de radiación ultravioleta con longitudes de onda menores (380 - 20 nm) y la zona de radiación infrarroja (780 nm - 10 000 nm).

En las telecomunicaciones por fibra óptica, se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo cercano o sea de 800 a 1.600 nm, siendo los valores preferidos los de 850, 1.300 y 1.550 nm.

En los textos de fibra óptica se utilizan, para la longitud de onda, tanto las unidades de micras como de nanómetros.

$$(1 \mu\text{m} = 1\,000 \text{ nm})$$

A algunas veces, la luz no se comporta como una onda, en lugar de ello, la luz se comporta como si estuviera constituida de pequeñas partículas llamadas fotones. La energía de un solo fotón es:

$$E_f = hf$$

donde $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js y es llamada la constante de Planck.
 f es la frecuencia.

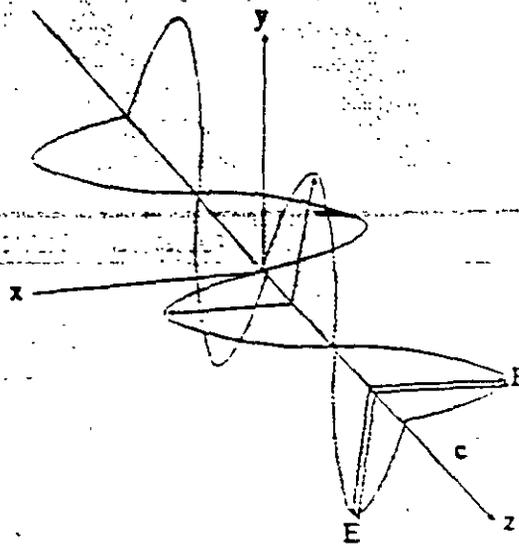
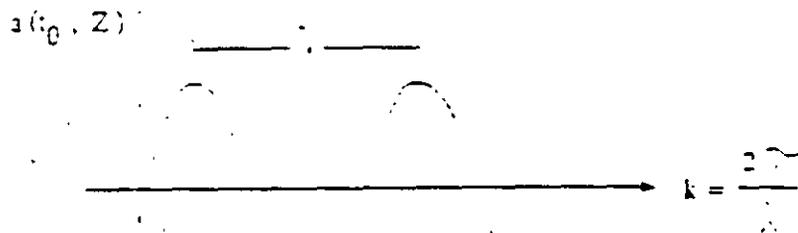
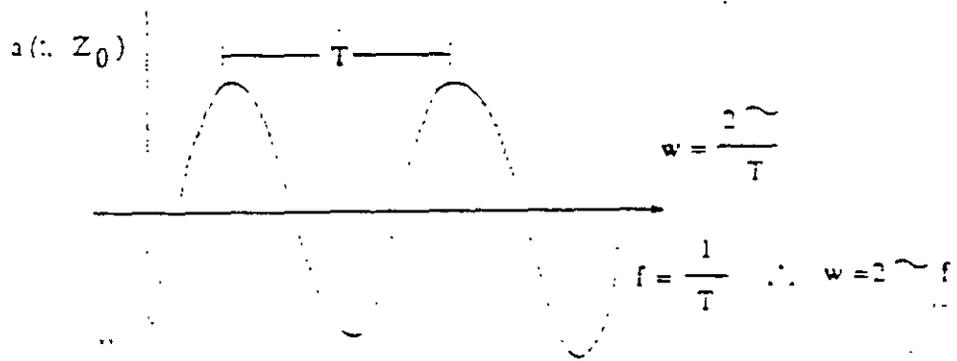


Figura 2.1 Onda electromagnética



$$a = A \cos(\omega t - kz)$$

Figura 2.2. Parámetros y ecuaciones básicas de una onda

a: valor instantáneo
A: amplitud
w: velocidad angular, en s^{-1}
t: tiempo en s
f: frecuencia en Hz

k: vector de onda
z: distancia sobre el eje z, en m
T: periodo en s
 λ : longitud de onda, en m

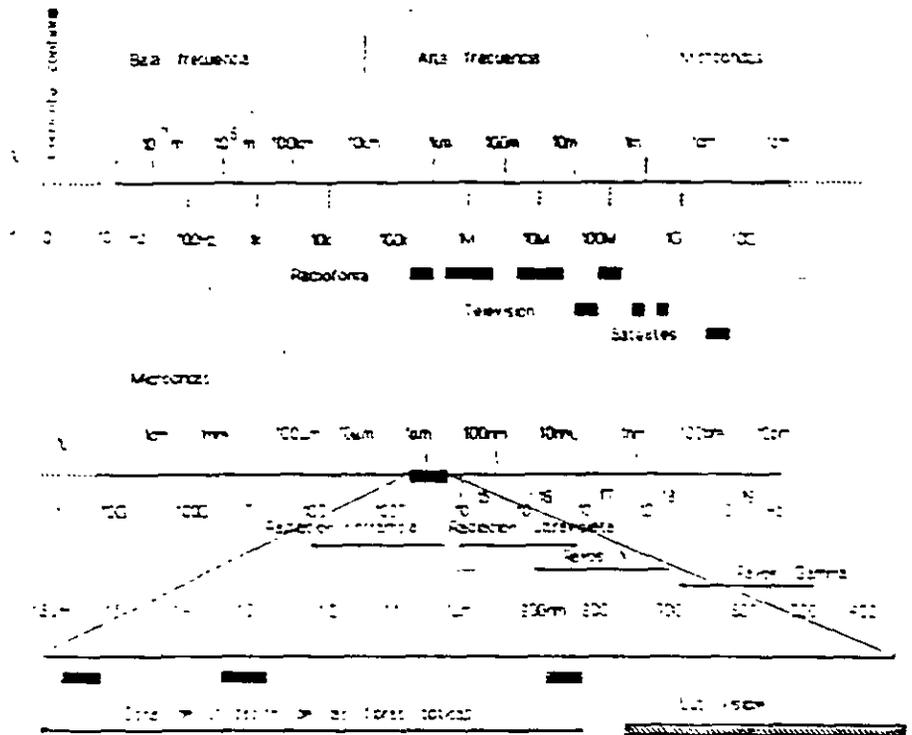


Figura 2.3
 Espectro electromagnético

Ejemplo

Una luz con una longitud de onda $\lambda = 1 \mu\text{m}$ tiene en el aire una velocidad de propagación $c = 300\,000 \text{ km/s}$. Calcular la frecuencia f de la onda luminosa:

formulando $c = \lambda f$

despejando $f = c / \lambda$

substituyendo $f = 300\,000 \text{ km/s} / 1 \mu\text{m} = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} / 1 \times 10^{-6} \text{ m}$

$f = 3 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} = 300 \text{ THz}$

Nota: $1/\text{s} = \text{s}^{-1} = 1 \text{ Hz}$

2.2 Teoría de Transmisión de Rayos de Luz

2.2.1 a) Concepto de índice de refracción

La transmisión de luz en fibras ópticas puede explicarse en la mayoría de los casos considerando la luz como rayos.

La teoría basada en este método se llama óptica geométrica.

En el vacío, los rayos de luz viajan a la velocidad $c = 3 \times 10^8$ m/s. En cualquier otro medio, los rayos viajan a una velocidad más lenta dada por:

$$v = c/n$$

El factor n es el índice de refracción del medio.

Para el aire, la velocidad de los rayos es muy cercana a c así que $n \approx 1$.

Un índice de refracción de 1.5 es representativo para el vidrio. A frecuencias ópticas el índice de refracción del agua es de 1.33. Un rayo de luz viaja más lentamente en un medio denso ópticamente que en uno menos denso y el índice de refracción es una medida de este efecto.

El índice de refracción n de una sustancia depende fundamentalmente de la correspondiente longitud de onda de la luz.

En el caso del dióxido de silicio (SiO_2 o sílice fundida) y las longitudes de onda del infrarrojo, de gran importancia para las comunicaciones ópticas, este índice decrece continuamente cuando se incrementa la longitud de onda.

La magnitud n vale para una longitud de onda.

En el caso de transmisión de información se involucra generalmente un grupo de longitudes de onda y debe considerarse el índice de refracción de grupo n_g .

$$n_g = n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)$$

TABLA 2.1 INDICE DE REFRACCION DE ALGUNOS MATERIALES

MATERIAL	INDICE DE REFRACCION
Aire	1.0
Dióxido de carbono	1.0
Alcohol etílico	1.36
Agua	1.33
Sílice	1.46
Vidrio	1.5
Polietileno	1.59
Silicon	3.5
Germanio	4.0
Zafiro	1.8
Calcita	1.6
Cloruro de sodio	1.54
Fluoruro de magnesio	1.38
Sulfuro de zinc	2.3
Arsenio de Galio	3.35
Arsenio de Galio indio	3.6

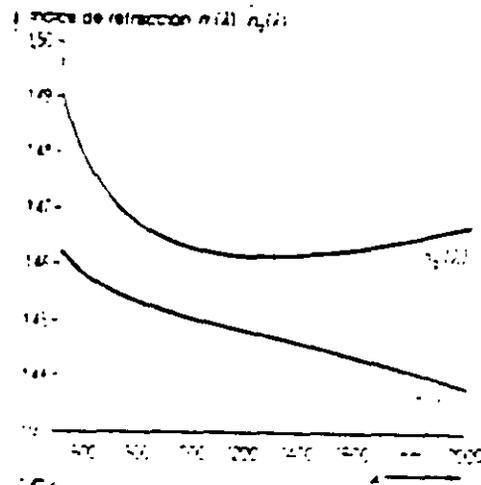


Figura 2.4
 Índice de refracción $n(\lambda)$ e índice de refracción de grupo $n_g(\lambda)$ para 100% de SiO_2

Ejemplo:

Con un índice de refracción $n = 1.5$ (valor típico del vidrio) obtener la velocidad de propagación de la luz.

$$v = c/n$$

$$v = 300\,000 \text{ km/s} / 1.5$$

$$v = 200\,000 \text{ km/s}$$

Equivalentemente:

$$v = 200 \text{ m/us}$$

$$\text{ó } 5 \mu\text{s en un kilómetro}$$

$$\text{ó } 5 \text{ ns en un metro}$$

2.2.1 b) Leyes de reflexión y refracción

- Cuando un rayo de luz incide en la interfase entre dos dieléctricos de diferentes índices de refracción (por ejemplo vidrio-aire) parte de la luz es reflejada y parte transmitida (Fig. 2.5).

- Los ángulos de los rayos incidente, reflejado y refractado (transmitido) se miden con respecto a la normal a la interfase.

- Los ángulos de los rayos incidente y reflejado son iguales.

$$\theta_1 = \theta_2$$

- Los ángulos de incidencia φ_1 y refracción φ_2 están relacionados por la Ley de Snell.

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

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

- En este caso $n_1 > n_2$ y por lo tanto $\theta_2 > \theta_1$

- Como una pequeña cantidad de luz es reflejada al medio de origen se dice que existe una reflexión interna parcial.

2.2.2 Reflexión interna total

Cuando el ángulo de refracción es 90° el rayo refractado emerge paralelo a la interfase entre los dos dieléctricos y el ángulo de incidencia es menor a 90° (Fig. 2.6).

Este es el caso límite de refracción y el ángulo de incidencia se conoce como ángulo crítico θ_c .

El valor del ángulo crítico está dado por:

$$\theta_c = \text{arc sen } n_2/n_1$$

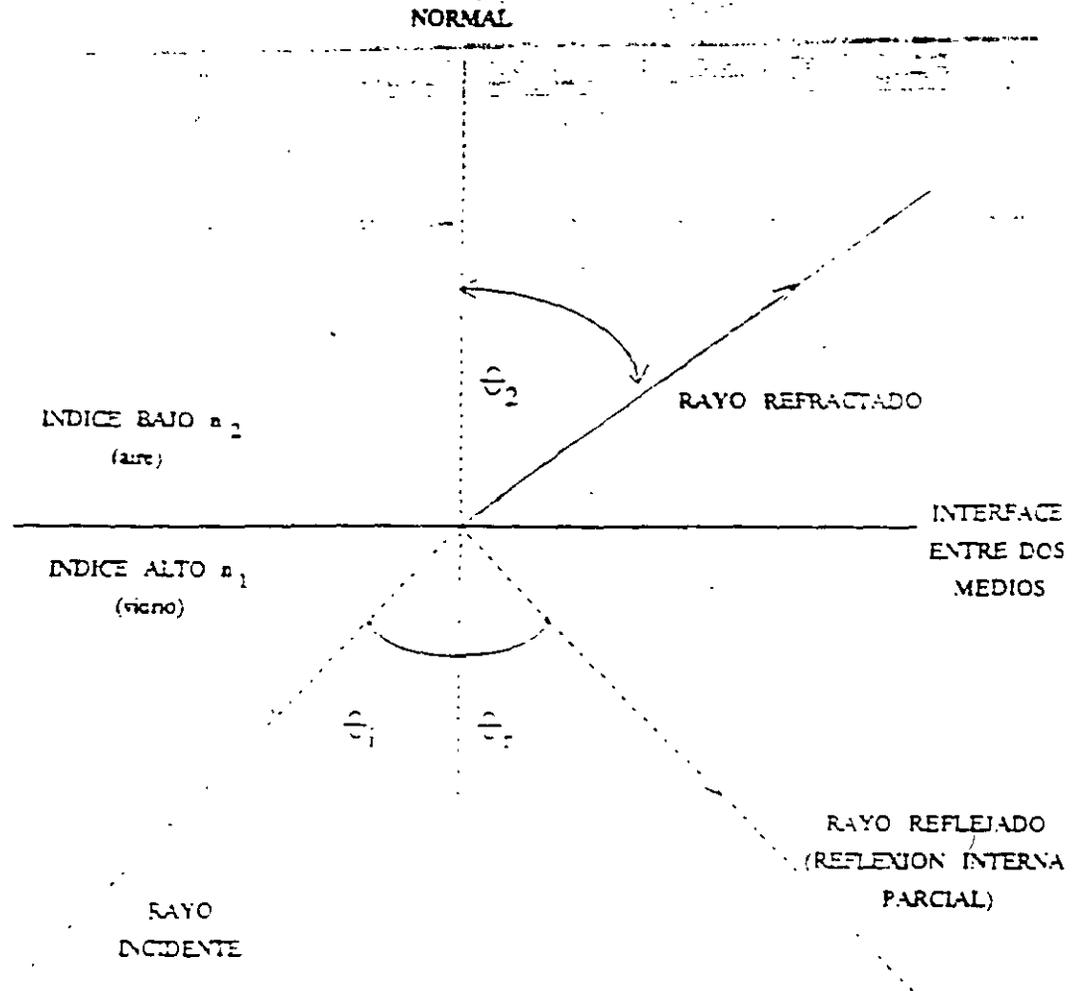


Figura 2.5

Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico la luz se refleja en el medio de origen con una eficiencia muy alta (mayor que 99.9%) esto se conoce como reflexión interna total (figura 2.7)

Este es el mecanismo mediante el cual la luz se propaga en las fibras ópticas con poca pérdida.

Si disminuimos los ángulos con respecto al eje de la fibra los rayos de luz que pueden propagarse son aquellos rayos rasantes con ángulos lo suficientemente pequeños (menores que $\theta_c = \theta_c$)

La Fig. 2.8 ilustra la transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica via una serie de reflexiones internas totales en la interfase del núcleo de sílice y del revestimiento de sílice con un índice de refracción ligeramente menor.

El rayo tiene un ángulo de incidencia θ con respecto a la normal mayor que θ_c y es reflejado con ese mismo ángulo θ .

El rayo que se muestra en la Fig. 2.8 cruza el eje del núcleo de la fibra, se conoce como rayo meridional y es el rayo más simple de describir.

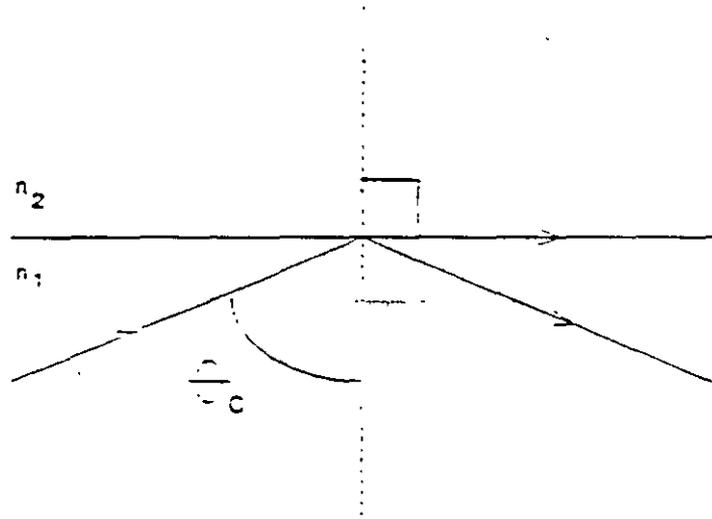


Figura 2.6
Caso límite de refracción mostrando el rayo crítico a un ángulo θ_c

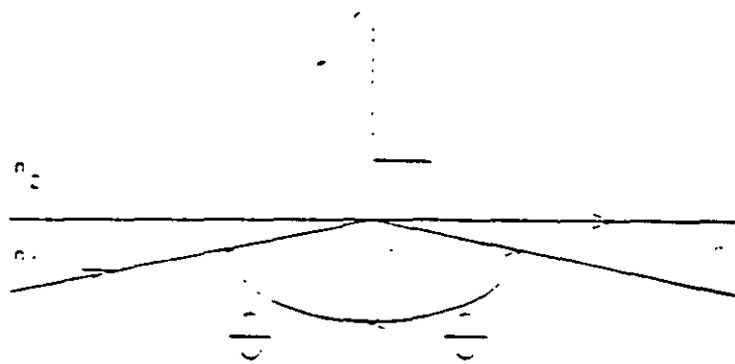


Figura 2.7
Reflexión interna total donde $\theta > \theta_c$

REVESTIMIENTO DE BAJO INDICE

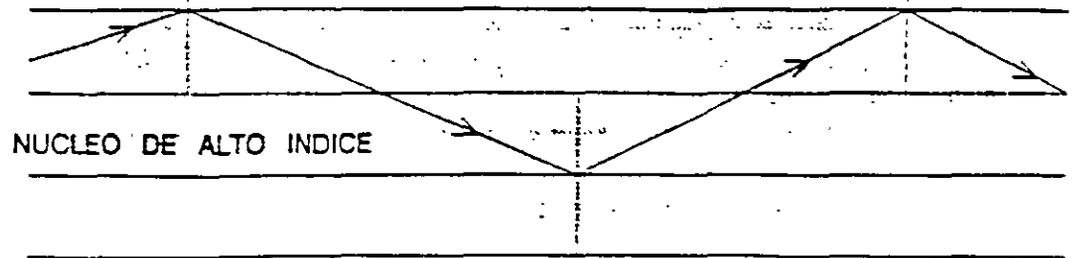


Figura 2.8
Transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal

2.2.3 Angulo de aceptación y apertura numérica

Análisis de los rayos que ingresan a la fibra.

No todos los rayos que entran al núcleo de la fibra serán propagados a lo largo de la fibra.

La geometría involucrada en el acoplamiento de un rayo de luz en la fibra se muestra en la figura 2.9.

Un rayo meridional A se propaga en la fibra con el ángulo crítico θ_c .

Puede observarse que este rayo ingresa a la fibra con un ángulo α y es refractado en la interfase aire-núcleo.

Cualquier rayo incidente con un ángulo mayor que θ_a será transmitido en la interfase núcleo-revestimiento con un ángulo menor que θ_c y no sea reflejado internamente en forma total.

El rayo B con un ángulo mayor que θ_a es refractado en el revestimiento y perdido por radiación.

Para que los rayos sean transmitidos por reflexión interna total dentro del núcleo de la fibra deben estar contenidos dentro de un cono de aceptación definido por el medio ángulo θ_a .

θ_a es entonces el ángulo máximo con relación al eje en el que la luz puede entrar en la fibra y ser propagada y se.

θ_a se conoce como el ángulo de aceptación de la fibra.

La relación entre los índices de los 3 medios y el ángulo de aceptación está dado por la apertura numérica NA:

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

$n_0 = 1$ ya que la fibra se utiliza generalmente en aire.

La apertura numérica NA también se da en términos de la diferencia relativa de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento :

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 = (n_1 - n_2) / n_1 \text{ para } \Delta \ll 1$$

$$NA = n_1 (\Delta)^{1/2}$$

θ_a : ANGULO CONICO MEDIO

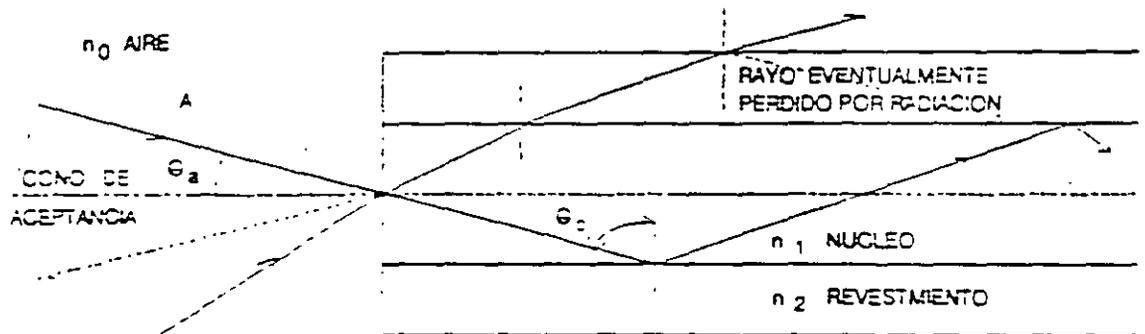


Figura 2.9

El ángulo de aceptación θ_a cuando se acopla luz en la fibra óptica

Ejemplo:

Una fibra óptica de sílice con un diámetro del núcleo lo suficientemente grande para ser considerado mediante análisis de teoría de rayos tiene un índice de refracción de 1.50 y un índice de refracción del revestimiento de 1.47.

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

Solución:

$$(a) \quad \theta_c = \arcsin n_2/n_1 = \arcsin 1.47/1.50 = 78.5^\circ$$

$$(b) \quad NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (1.50^2 - 1.47^2)^{1/2}$$

$$= (2.25 - 2.16)^{1/2}$$

$$= 0.30$$

$$(c) \quad \theta_a = \arcsin NA = \arcsin 0.30$$

$$= 17.4^\circ$$

2.2.4 Rayos oblicuos

Un gran número de rayos transmitidos no pasan por el eje de la fibra.

Estos rayos siguen una trayectoria helicoidal a través de la fibra y se llaman rayos oblicuos.

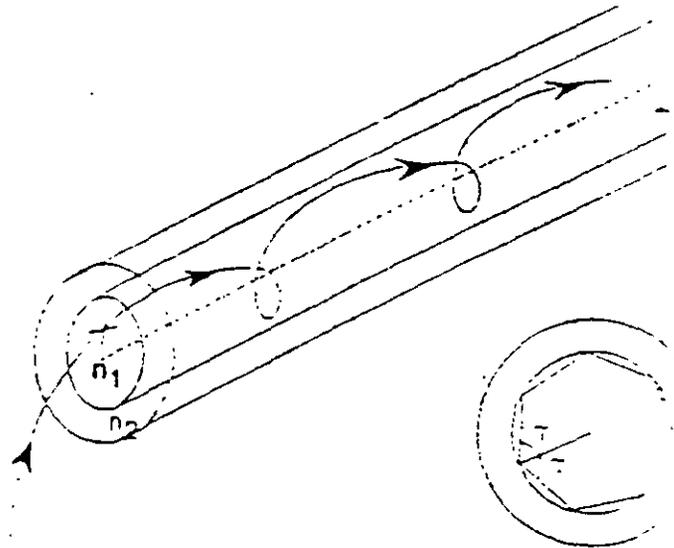


Figura 2.10

(a) Trayectoria helicoidal seguida por un rayo oblicuo en una fibra óptica
(b) Vista de la sección transversal de la fibra

2.3 Modos Electromagnéticos de Propagación Óptica

2.3.1 Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas

Para obtener un modelo más completo para la propagación de la luz en fibras ópticas, se debe utilizar la teoría de ondas electromagnéticas.

La base para el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas está dada por las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \text{ en la ausencia de cargas libres (medio dieléctrico)}$$

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

\mathbf{E} : Vector Intensidad Campo Eléctrico

\mathbf{H} : Vector Intensidad Campo Magnético

\mathbf{D} : Vector Desplazamiento Eléctrico

\mathbf{B} : Vector Densidad Campo Magnético

Los cuatro vectores están relacionados por:

$$D = \epsilon E \text{ y } B = \mu H$$

ϵ : permitividad eléctrica del medio

μ : permeabilidad magnética del medio

Las ecuaciones anteriores pueden ser combinadas para obtener la ecuación de onda:

$$\nabla^2 \Psi = (1/v^2) (\partial^2 \Psi / \partial t^2)$$

Donde Ψ es el campo E ó H y v es la velocidad de propagación

$$v = 1/(\mu\epsilon)^{1/2}$$

La solución básica de una ecuación de onda es una onda senoidal:

$$\Psi = \Psi_0 \exp j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) = \Psi_0 \cos(\omega t - k \cdot r) - j \Psi_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

r : vector de posición.

2.3.2 Modos de propagación en fibras ópticas.

Cuando se aplican las ecuaciones de Maxwell al análisis de fibras ópticas y considerando las condiciones de frontera en la interfase núcleo-revestimiento se obtiene que:

- Existe un número finito de soluciones.
- Cada solución recibe el nombre de modo de propagación.
- Un modo corresponde entonces a una distribución del campo electromagnético que puede existir en el interior de la guía de onda y que es propagado.

El número de modos en una fibra óptica es directamente proporcional al diámetro del núcleo, a la diferencia de índices núcleo-revestimiento e inversamente proporcional a la longitud de onda.

Las fibras ópticas que soportan muchos modos de propagación se conocen como fibras multimodales.

- Para fibras multimodales el análisis más simple de teoría de rayos es satisfactorio.
- Puede decirse que en este caso un rayo de luz corresponde a un modo de propagación.

La fibra óptica que soporta un solo modo de propagación se denomina fibra unimodal.

- En este caso el análisis de teoría de rayos no funciona y debe utilizarse el análisis de teoría electromagnética.

Merecen ser mencionados los siguientes casos especiales:

$g = 1$: perfil triangular

$g = 2$: perfil parabólico

$g \rightarrow \infty$: perfil escalonado (caso límite).

Solamente en el caso del perfil escalonado el índice de refracción en el núcleo es constante. En todos los demás perfiles, el índice se incrementa gradualmente del valor n_2 en el revestimiento hasta el valor n_1 en el eje de la fibra.

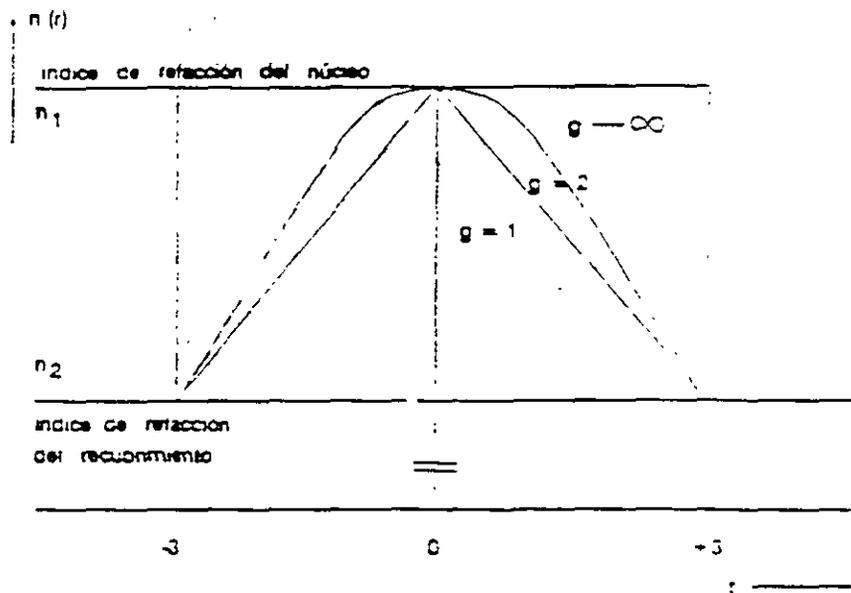


Figura 2.12
Perfil de índices de refracción en fibras ópticas

2.5 Frecuencia Normalizada y Número de Modos

Un valor muy útil en la descripción de fibras ópticas es el parámetro V , el cual se define como

$$V = (2\pi a/\lambda) NA$$

El número de modos depende de este parámetro V .

Para una fibra de índice escalonado, el número de modos M está dado por:

$$M \approx V^2/2$$

Para una fibra de índice gradual parabólico ($g = 2$)

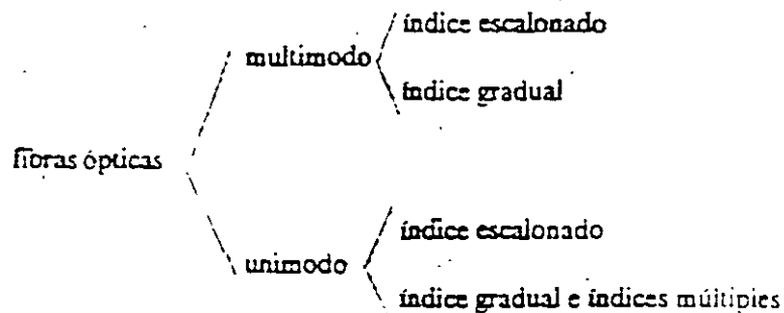
$$M \approx V^2/4$$

Una fibra óptica transporta un solo modo de propagación si se cumple la condición siguiente:

$$V < 2.405$$

2.6 Clasificación de Fibras Ópticas

Las fibras ópticas pueden clasificarse de acuerdo al número de modos de propagación y a su perfil de índice de refracción de la siguiente manera:



La fibra unimodo de índice gradual e índices múltiples se describe en el punto correspondiente a dispersión

2.6.1 Fibra multimodal de índice escalonado

Ejemplo:

Dimensiones típicas:

Diámetro del núcleo	$2a$	100 μm
Diámetro del revestimiento	D	140 μm
Índice de refracción del núcleo	n_1	1.48
Índice de refracción del revestimiento	n_2	1.46

Angulo crítico:

$$\theta_c = \text{arc sen } n_2/n_1 = \text{arc sen } 1.46/1.48 = 80.6^\circ$$

Se propagaran todos los rayos luminosos que formen con el eje de la fibra un ángulo menor o igual a $(90^\circ - \theta_c) = 9.4^\circ$.

Apertura numerica NA:

$$NA = (1.48^2 - 1.46^2)^{1/2} = 0.242$$

Angulo de aceptación θ_a :

$$\theta_a = \text{arc sen } NA = \text{arc sen } (0.242) = 14.0^\circ$$

La diferencia relativa de índices de refracción

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 = (1.48 - 1.46) / 1.48 = 0.0135 = 1.35 \%$$

El parámetro V para $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$:

$$V = (2\pi a / \lambda) NA = 2\pi \times 50 \mu\text{m} / 0.85 \mu\text{m} \times 0.242 = 89.4$$

El número de modos M para esta fibra es:

$$M = V^2 / 2 = 89.4^2 / 2 = 3996$$

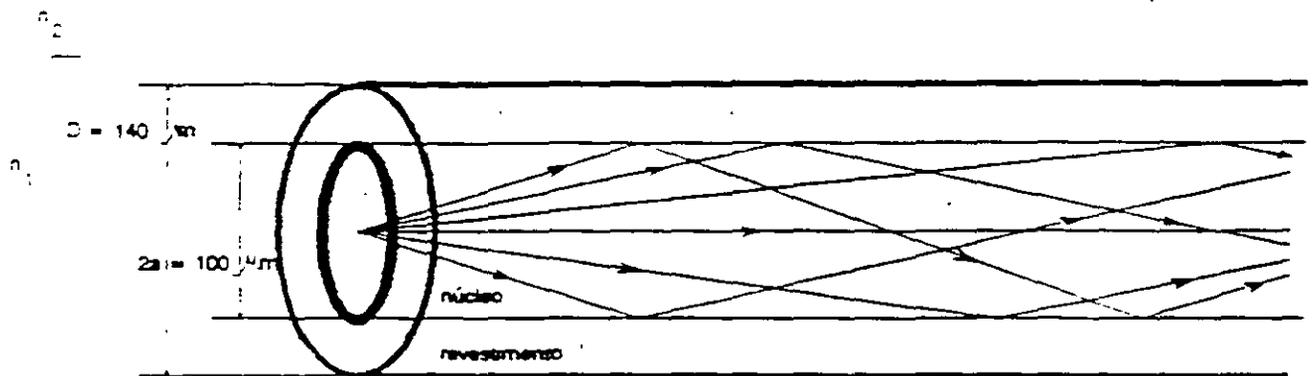


Figura 23
Fibra óptica multimodo de índice escalonado

2.6.2 Fibra multimodal de índice gradual

La fibra óptica multimodal de índice escalonado presenta el problema de la gran diferencia que existe entre las velocidades de propagación del modo más rápido y del más lento (dispersión modal).

Para reducir este problema se propuso la fibra óptica de índice gradual con perfil parabólico ($g = 2$).

Esta variación de índice compensa la diferencia de velocidades ya que los rayos de luz que recorren distancias más largas viajan más rápido que los rayos que van cerca del eje que viajan más lento.

La variación de índice reduce significativamente el efecto de dispersión.

La trayectoria que siguen los rayos de luz es senoidal.

Los rayos de luz se refractan continuamente.

Dimensiones típicas:

Diámetro del núcleo $2a = 50 \mu\text{m}$

Diámetro del revestimiento $D = 125 \mu\text{m}$

Índice de refracción máximo en el núcleo $n_1 = 1.46$

Diferencia relativa de índices de refracción $\Delta = 0.01$ ó 1%

Apertura numérica $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}^{1/2} = 1.46 \sqrt{2 \times 0.01}^{1/2} = 0.206$

Angulo de aceptación $\theta_a = \text{arc sen } 0.206 = 11.9^\circ$

Parámetro V para $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$

$$V = (2\pi a / \lambda)(NA) = (2\pi \times 25 \mu\text{m} / 0.85 \mu\text{m})(0.206) = 38$$

Número de modos $M \approx V^2/4 = 1444/4 = 361.63$

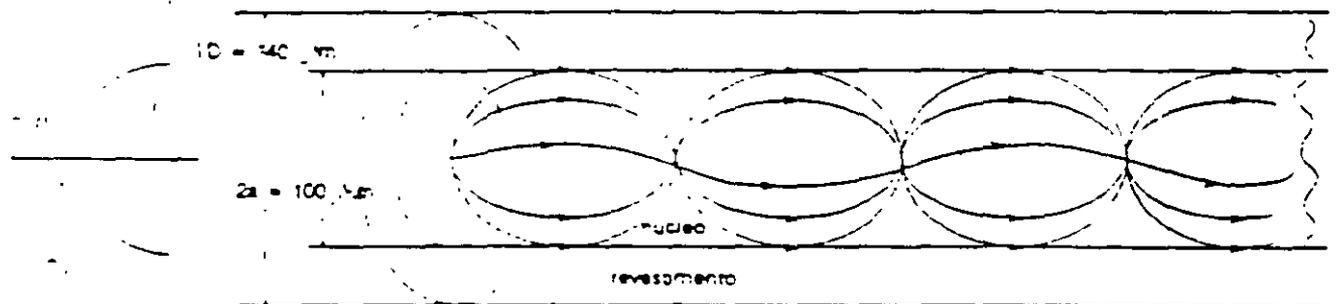


Figura 2.14 Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos en una fibra de índice gradual

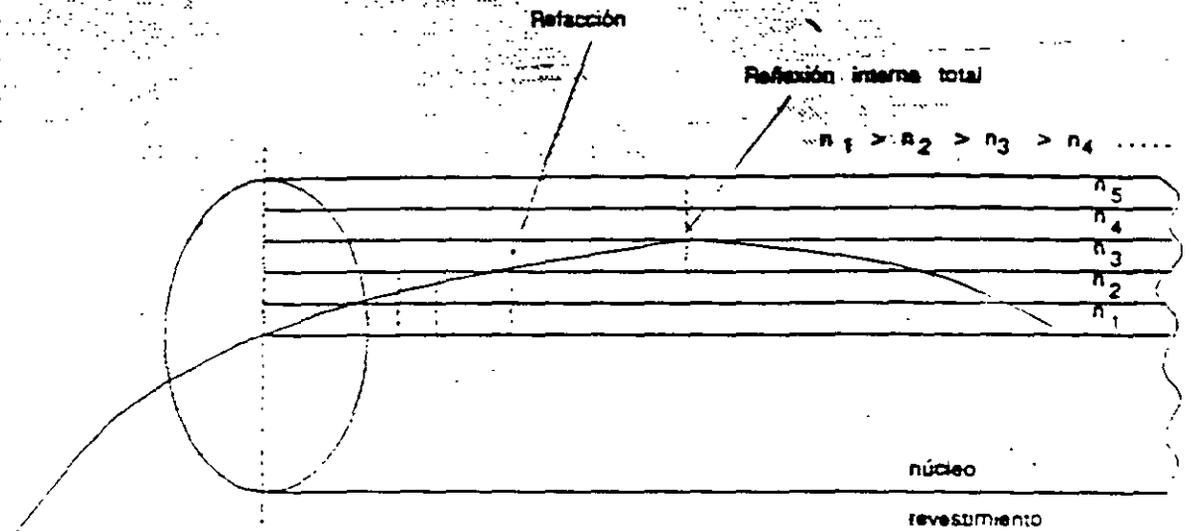


Fig. 2.15 Refracción continua en una fibra de índice gradual y trayectoria curva del rayo de luz

2.6.3. Fibra unimodal de índice escalonado

La dispersión modal se puede eliminar totalmente dimensionando la fibra óptica para que conduzca a un único modo: el modo fundamental LP₀₁.

La fibra es unimodal si cumple $V < 2.405$

Esto puede lograrse reduciendo o incrementando.

Para describir el valor del modo fundamental se ha introducido el diámetro de campo $2 \times W_0$:

$$W_0 = (2.6/V)a$$

Ejemplo

$2W_0 = 10 \mu\text{m}$ para una fibra de índice escalonado, baja atenuación y en la cual a longitudes de onda mayores a 1200 nm se propague únicamente el modo fundamental.

Dimensiones típicas

Diámetro del núcleo	2a	8.5 μm
Diámetro del campo	2W ₀	10 μm
Diámetro del revestimiento	D	125 μm
Índice de refracción del núcleo	n ₁	1.46
Diferencia de índices de refracción	Δ	0.003 = 0.3 %

$$\text{Apertura numérica NA} = n_1 \sqrt{2\Delta}^{1/2} = 1.46 \sqrt{2 \times 0.003}^{1/2} = 0.113$$

$$\text{Ángulo de aceptación } \theta_a = \arcsen \text{NA} = \arcsen 0.113 = 6.5^\circ$$

Debido a que el diámetro del núcleo y la apertura numérica son más pequeños el acoplamiento de luz es relativamente difícil.

Existe una longitud de onda límite (arriba de la cual solo se propaga el modo fundamental) también conocida como longitud de onda de corte. El parámetro V es $V_c = 2.405$:

$$\lambda_c = \pi \times 2aNA/V_c = \pi \times 8.5 \mu\text{m} \times 0.113/2.405 = 1.255 \mu\text{m} = 1255 \text{ nm}$$

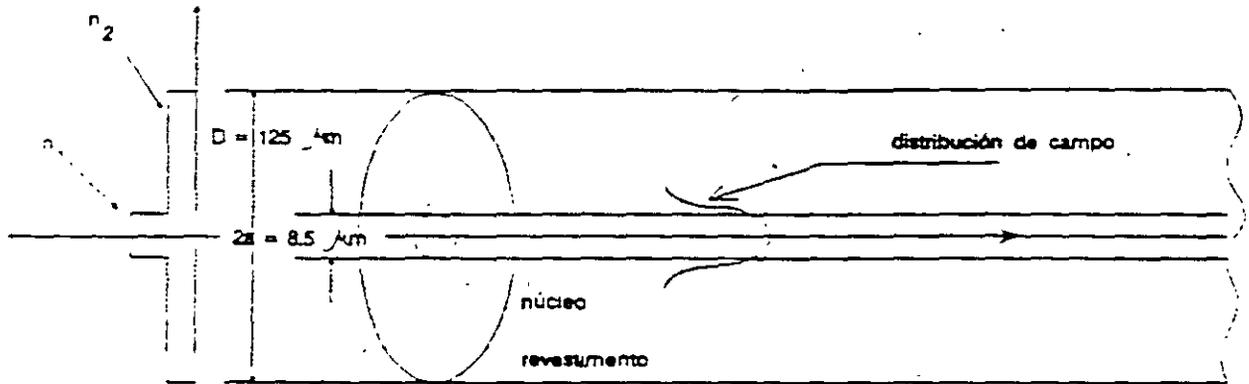


Figura 2.16 Fibra óptica unimodo

Figura 2.17
Distribucion radial del campo del modo fundamental LP₀₁

3. CARACTERISTICAS DE TRANSMISION DE LAS FIBRAS OPTICAS.

3.1 Atenuación

La luz que se propaga en una fibra óptica experimenta una atenuación, es decir, en la fibra se produce una pérdida de energía.

La atenuación es uno de los dos factores que determinan la distancia de transmisión antes de que se tenga que regenerar la señal.

Una de las características atractivas de las fibras ópticas es que la atenuación es más baja que en conductores metálicos (menor a 5 dB/km).

La atenuación de una señal generalmente se expresa en la unidad logarítmica del decibel. Este se define como:

$$\text{número de decibeles (dB)} = 10 \log_{10} P_i/P_o$$

donde P_i es la potencia de entrada o transmitida y P_o es la potencia de salida o recibida.

En fibras ópticas, la atenuación generalmente se expresa en decibeles por unidad de longitud por ejemplo dB/km. El símbolo usualmente utilizado para este parámetro es α .

Diversos mecanismos son responsables de la atenuación de la señal en fibras ópticas. Los más importantes en la práctica son:

- Absorción del material (intrínseca y extrínseca)
- Pérdidas por esparcimiento Rayleigh.

La absorción del material está relacionada con la composición del material y con el proceso de fabricación de la fibra, lo que resulta en disipación de la potencia óptica transmitida en forma de calor.

ABSORCIÓN INTRINSECA: Causada por la interacción de uno o más de los principales componentes del vidrio.

ABSORCIÓN EXTRINSECA: Causada por impurezas dentro del vidrio.

3.2 Atenuación por Absorción del Material

3.2.1 Absorción intrínseca

El vidrio puro tiene poca absorción intrínseca debido a la estructura básica del material en la región del cercano infrarrojo.

Dos mecanismos de absorción intrínseca dejan una ventana de baja absorción en el rango de longitudes de onda de 0.8 a 1.7 μm .

En longitudes de onda más cortas la absorción aumenta debido a la estimulación de transiciones electrónicas en el vidrio (absorción ultravioleta).

En longitudes de onda más largas la absorción aumenta a causa de la interacción de los fotones con vibraciones moleculares (absorción infrarroja).

3.2.2 Absorción extrínseca

Es la absorción causada por impurezas de elementos metálicos tales como cromo, cobre, hierro, níquel, manganeso o vanadio.

Una parte en mil millones de cromo o cobre producen una atenuación de 1 dB/km.

Las técnicas de fabricación mediante oxidación en fase de vapor eliminan grandemente estas impurezas (a niveles aceptables de una parte en diez mil millones).

Otra fuente importante de atenuación es la absorción producida por el agua en forma de el ion OH disuelto en el vidrio.

Este ion se fusiona en la estructura del vidrio y tiene vibraciones fundamentales en el rango de longitudes de onda de 2.7 a 4.2 μm .

Sobretonos de absorción existen en 1.38, 0.95 y 0.72 μm .

3.3 Atenuación por Esparcimiento

3.3.1 Esparcimiento Rayleigh y de Mie

El esparcimiento óptico consiste básicamente en un cambio de dirección de la onda luminosa.

Esto produce pérdidas porque parte de la energía luminosa es transferida de modos de propagación a modos de radiación.

La palabra inglesa para esparcimiento es "scattering" y debe tenerse cuidado porque también puede traducirse como "dispersión" y confundirse con el término utilizado para el ensanchamiento de los pulsos que se explica más adelante.

El esparcimiento Rayleigh es el mecanismo de pérdida dominante en la ventana de baja absorción entre las "colas" de absorción ultravioleta e infrarroja.

Resulta de inhomogeneidades de naturaleza aleatoria que ocurren en pequeña escala comparada con la longitud de onda de la luz.

Este efecto de esparcimiento no puede eliminarse y presenta por tanto un límite fundamental en la atenuación de las fibras.

La atenuación es proporcional a λ^{-4} .

La atenuación por efecto de esparcimiento Rayleigh es entonces menor para longitudes de onda más largas.

El esparcimiento de Mie se debe a imperfecciones en la estructura de la guía tales como fluctuaciones del diámetro del núcleo y que son comparables con la longitud de onda.

Con altos niveles de calidad en el proceso de fabricación la atenuación por esparcimiento Mie puede reducirse a niveles muy pequeños.

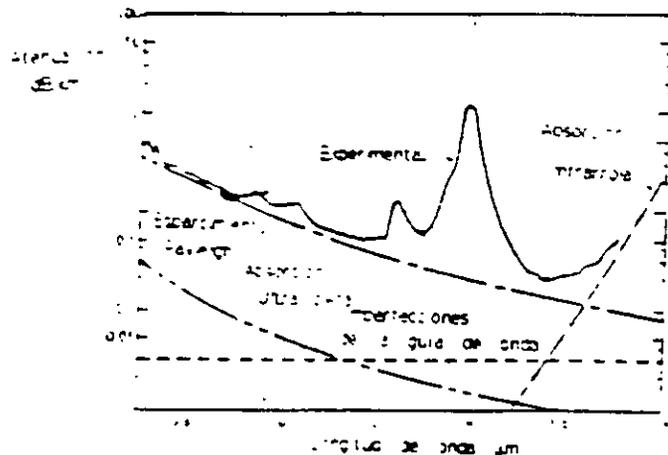


Figura 3.1
Atenuación de una fibra óptica con respecto a la longitud de onda

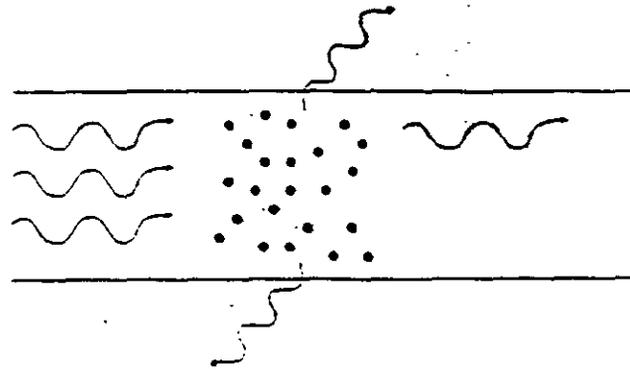


Figura 3.2
Esparcimiento Rayleigh debido a inhomogeneidades más pequeñas que la longitud de onda

3.4 Atenuación por Curvatura Continua

Una curvatura en una fibra óptica produce atenuación.

Las fibras ópticas pueden ser dobladas con radios de curvatura tan pequeños como 10 cm sin que se produzcan pérdidas apreciables.

Existen dos formas de explicar el mecanismo de atenuación en una curvatura.

Utilizando óptica geométrica podemos inferir que en una curvatura, los rayos de luz que viajan con un ángulo cercano al ángulo crítico pueden exceder a este localmente en algún punto en la curva y al ser refractados al revestimiento, escapar de la guía.

Utilizando la distribución de campo del modo de propagación, podemos decir que la parte de energía luminosa que se mueve fuera del doblar se mueve más rápido que la luz dentro de la curva.

- Entre más pequeño es el radio de curvatura, mayor es la velocidad de la luz fuera del doblar.
- La velocidad de la parte externa puede exceder la velocidad de la luz en ese punto de la curva y esa parte de la energía luminosa es entonces radiada.

La atenuación por curvatura c tiene la forma exponencial:

$$c = c_1 \exp(-c_2 R)$$

donde c_1 y c_2 son constante y R es el radio de curvatura.

El valor mínimo del radio de curvatura a partir del cual las pérdidas son importantes se conoce como radio crítico R_c .

Para una fibra óptica no cableada este radio tiene un valor pequeño ($R_c = 2 \text{ cm}$).

Para un cable se debe considerar además el radio mínimo de curvatura dado p fabricante.

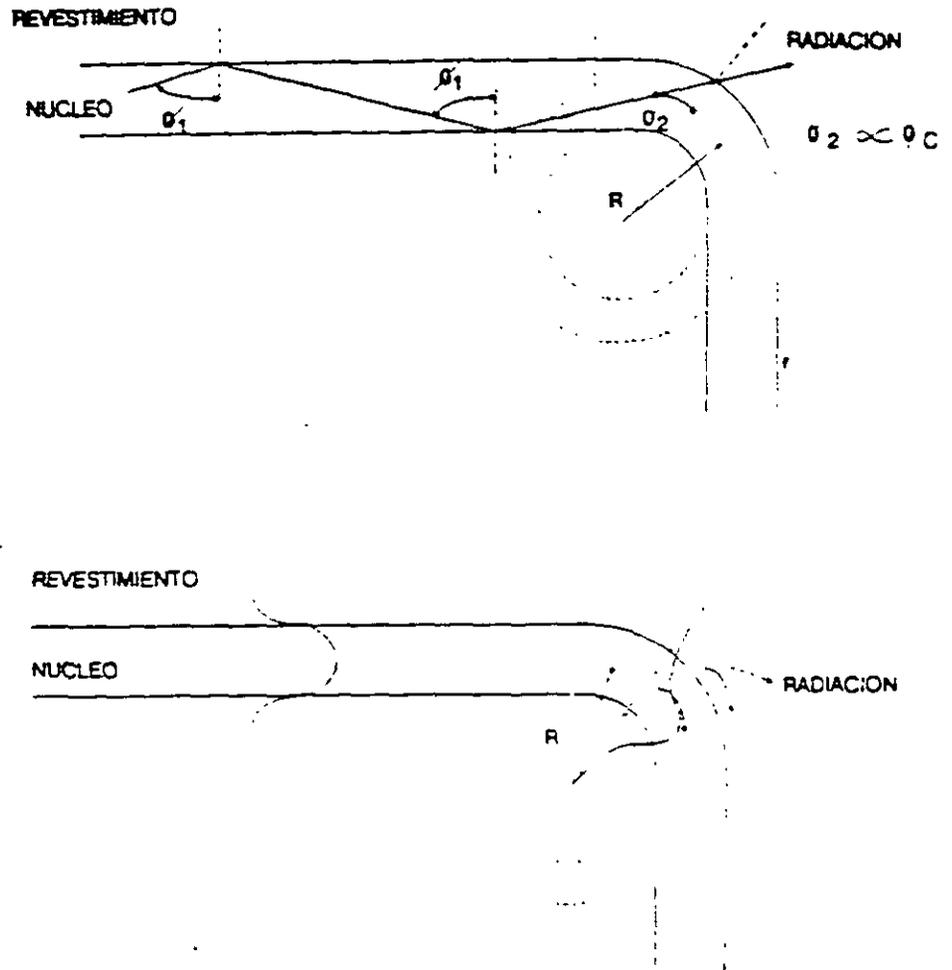


Figura 3.3
Explicación de la pérdida de energía luminosa en una curvatura o doblez de la fibra
a) rayo de luz
b) Modo de propagación

3.5 Atenuación por Microcurvaturas

Es posible que en la práctica, una fibra óptica sufra deformaciones microscópicas sobre su eje. Por ejemplo, bajo ciertas condiciones dentro de un cable óptico.

Si el radio de curvatura es similar a el radio del núcleo de la fibra entonces se produce un fuerte mecanismo de atenuación debido nuevamente a conversión de modos de propagación a modos de radiación.

Por ejemplo: 100 microcurvaturas en 1 km producen una atenuación de 20 dB/km.

Como se verá en la sección de cables este problema puede resolverse liberando a la fibra óptica de presión mediante la elección de recubrimientos adecuados.

Una relación experimental aproximada para las pérdidas por microcurvaturas está dada por:

$$\alpha \text{ microcurvaturas} = k (\text{radio del núcleo}/\text{radio de la fibra})^2 (1/NA)^4$$

donde k es un factor de proporcionalidad.

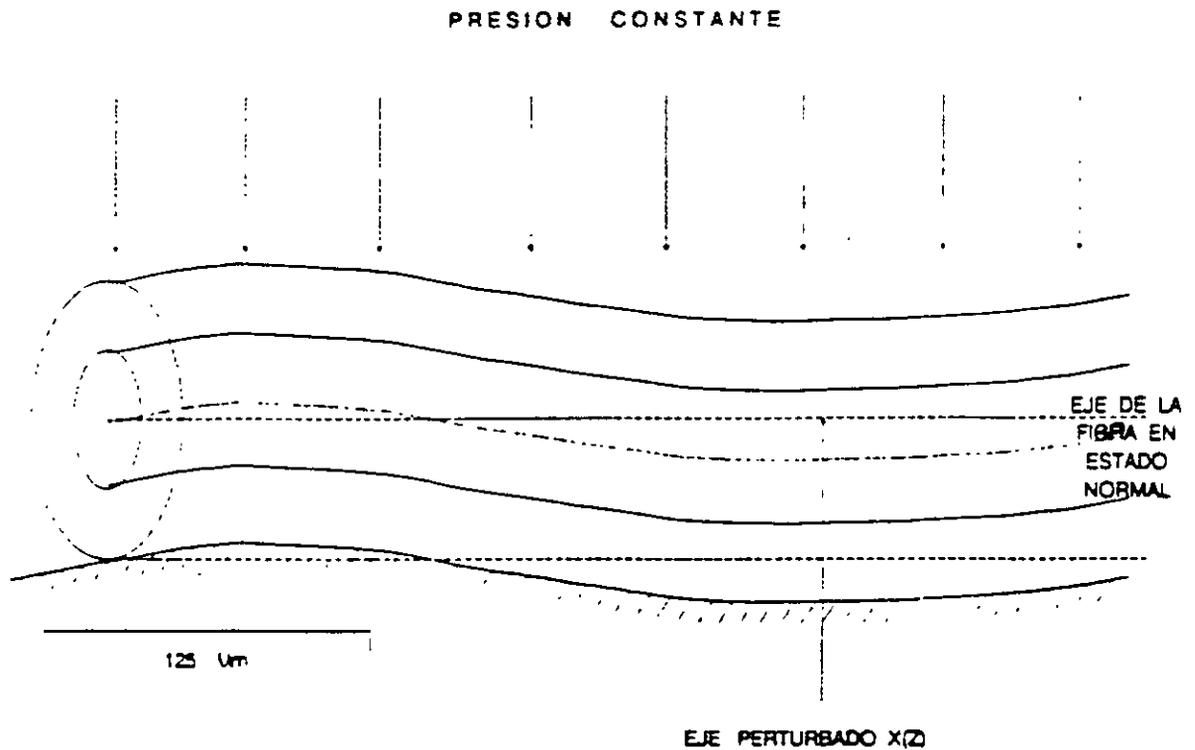


Figura 3.4

3.6 Dispersion

La dispersión de la señal óptica transmitida causa distorsión en la transmisión digital a lo largo de la fibra.

Los mecanismos de dispersión en la fibra causan ensanchamiento de los pulsos de luz transmitidos.

Cada pulso se ensancha y se traslapa con sus vecinos, y eventualmente no se puede distinguir de los pulsos adyacentes a la entrada del receptor.

Este efecto se conoce como interferencia entre símbolos y conforme se incrementa, aumenta el número de errores en el canal digital. La dispersión de la señal es el factor que limita el ancho de banda máximo posible para una fibra óptica particular.

Dado que la dispersión total es función de la longitud, la dispersión es el segundo factor que limita la separación máxima entre terminales o repetidores

El ancho de un pulso se define generalmente como el ancho rms σ de un pulso Gaussiano

La tasa máxima de transmisión está dada aproximadamente por:

$$BT(\max) = 0.2 / \sigma \quad \text{bits/s}$$

La conversión de velocidad de transmisión en bits/s a ancho de banda en Hertz depende del código utilizado.

RZ Regreso a cero
NRZ No regreso a cero.

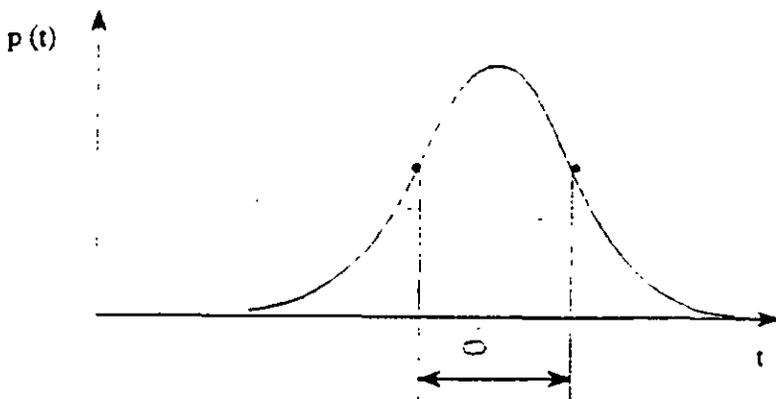


Figura 3.5
Ancho rms σ de un pulso gaussiano

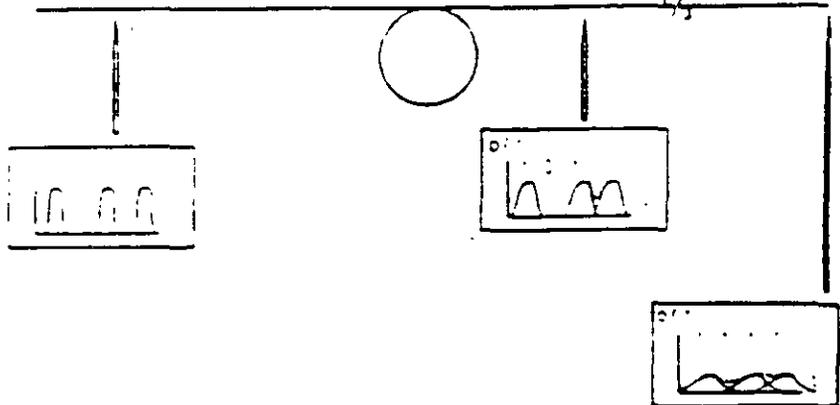


Figura 3.6.

3.6.1 Comparación de dispersión para los tres tipos de fibra óptica

La fibra óptica multimodo de índice escalonado es la que exhibe la mayor dispersión.

La fibra óptica multimodo de índice gradual presenta una dispersión considerablemente menor que la fibra anterior.

Finalmente la fibra unimodo da el ensanchamiento mínimo de los pulsos y es capaz de los anchos de banda de transmisión más grandes (En el orden de Gigahertz).

La cantidad de ensanchamiento del pulso depende de la distancia.

Las propiedades dispersivas de una fibra en particular se establecen generalmente en ensanchamiento del pulso por unidad de longitud.

Ejemplo:

$$\text{ns/km ó ns km}^{-1}$$

El ancho de banda es por lo tanto inversamente proporcional a la distancia.

Un parámetro útil para cuantificar la capacidad de transmisión de información de una fibra óptica es el producto ancho de banda longitud.

BL

Los mejores productos ancho de banda-longitud para los tres tipos de fibra son:

- Fibra multimodo de índice escalonado 20 MHzkm.
- Fibra multimodo de índice gradual 1 GHzkm.
- Fibra unimodo de índice escalonado 100 GHzkm.

Los mecanismos de dispersión son básicamente:

- Dispersión intermodal
- Dispersión Cromática / Dispersión del Material (o intramodal)
- Dispersión de guía de onda.

3.6.2 Dispersión intermodal

El ensanchamiento del pulso debido a dispersión intermodal (también llamada dispersión modal) resulta de las diferencias de retardo de propagación entre los diferentes modos en una fibra multimodo.

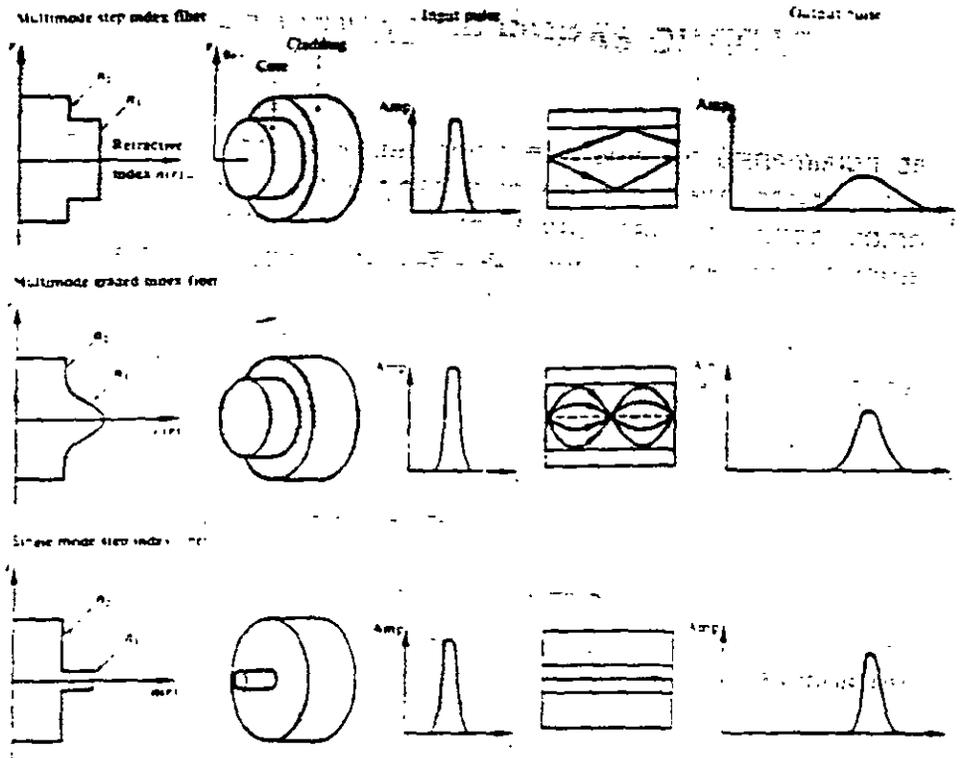


Figura 3.7

Los diferentes modos que constituyen un pulso en una fibra multimodo viajan a velocidades diferentes.

El ancho del pulso a la salida depende de los tiempos de transmisión entre el modo mas lento y el mas rapido.

La fibra óptica multimodo de índice escalonado presenta una gran dispersión intermodal.

La fibra óptica multimodo de índice gradual reduce mediante la elección de un perfil parabólico ($g = 2$) la dispersión intermodal en un factor de 100 veces con respecto a la de índice escalonado.

La dispersión intermodal en una fibra de índice escalonado está dada por:

$$\sigma_{\text{índice escalonado}} = Ln_1 \Delta \sqrt{3} C$$

y en una fibra de índice gradual parabólico:

$$\sigma_{\text{índice gradual}} = Ln_1^2 / (20 \sqrt{3} C)$$

La menor dispersión de este último tipo de fibra se debe a un proceso de equalización de las velocidades de propagación de los diferentes modos.

- Los modos que recorren trayectorias más largas "ven" un índice de refracción menor y viajan a velocidades más altas.

3.6.3 Dispersión cromática

La dispersión cromática o intramodal ocurre en todos los tipos de fibra.

Resulta del ancho de línea espectral finito de la fuente óptica.

Las fuentes ópticas no emiten una frecuencia única sino una banda de frecuencias.

Existen diferencias entre las velocidades de propagación de cada componente de longitud de onda.

Esto causa ensanchamiento para cada modo.

Las diferencias de retardo pueden ser causadas por:

- Dispersión del material δ
- Dispersión de guía de onda.

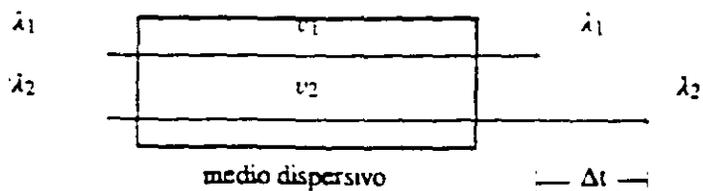


Figura 3.8
Esquema de dispersión del material

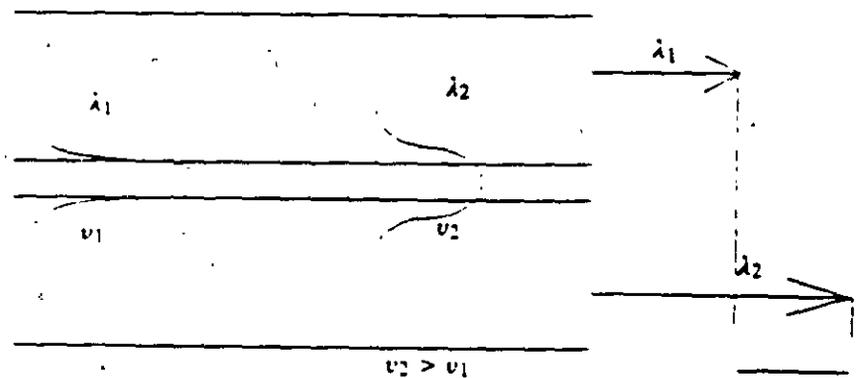


Figura 3.9
Esquema de dispersión de guía de onda

3.6.4 Dispersión del material

Un material exhibe dispersión del material cuando la segunda derivada del índice de refracción con respecto a la longitud de onda no es cero.

$$d^2n/d\lambda^2 \neq 0$$

El ensanchamiento rms del pulso debido a la dispersión del material está dada por:

$$\sigma_m = \sigma \lambda LM$$

donde

σ = ancho espectral de la fuente

L = longitud de la fibra

M = parámetro de dispersión del material = $\lambda/c \cdot d^2n_1/d\lambda^2$

El parámetro M se expresa usualmente en unidades de:

$$\text{ps}/(\text{nm})(\text{km}) \text{ ó } (\text{ps})(\text{nm}^{-1})(\text{km}^{-1})$$

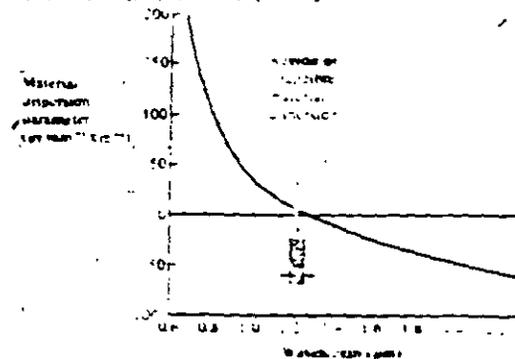


Figura 3.10
Parámetro de dispersión del material para el silicio

3.6.5 Dispersión de guía de onda

La dispersión de guía de onda no tiene un efecto significativo en fibras multimodo pero debe ser considerado en fibras unimodo.

Cada longitud de onda para el modo fundamental tiene una distribución de campo ligeramente diferente y por tanto cada distribución viaja a una velocidad diferente.

3.6.6. Dispersión total

3.6.6.1 Fibras multimodo

Comprende ambos términos de dispersión intermodal y cromática. El ensanchamiento del pulso rms total T está dado por:

$$\sigma_T = (\sigma_c^2 + \sigma_i^2)^{1/2}$$

donde

σ_c es el ensanchamiento cromático

σ_i es el ensanchamiento intermodal.

3.6.6.2 Fibras unimodo

El ensanchamiento de los pulsos en fibras unimodo se debe solamente a la dispersión cromática e intramodal.

El ancho de banda está limitado por el ancho espectral de la fuente.

La dispersión total está dada por la combinación de la dispersión del material y de la dispersión de guía de onda.

En una fibra óptica unimodal de índice escalonado la dispersión del material cancela la dispersión de guía de onda aproximadamente en la longitud de onda de 1.3 μm siendo la dispersión total cero o mínima.

La dispersión de guía de onda puede modificarse mediante el diseño de perfiles de índice adecuados y modificar así la dispersión total.

Pueden distinguirse 3 clases de perfiles de índice de acuerdo con sus características de dispersión que son de interés en telecomunicaciones.

Clase 1: Sin desplazamiento de la dispersión.

- Perfil escalonado normal.
- Perfil escalonado con índice de refracción rebajado.

Clase 2: Con desplazamiento de la dispersión.

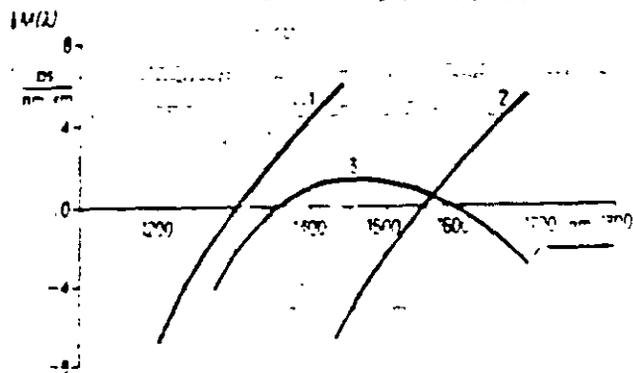
- Perfil triangular.
- Perfil segmentado con núcleo triangular.
- Este tipo de fibras es importante porque se hace coincidir el mínimo de atenuación a 1.55 μm con el mínimo de dispersión.

Clase 3: Con dispersión plana.

- Perfil tipo W (revestimiento doble).
- Perfil segmentado con cuatro escalones del índice de refracción (revestimiento cuádruple).

Este tipo de perfil es importante porque al mantener la dispersión muy baja en un rango de longitudes de onda, se podría utilizar una técnica de multiplexación en el dominio de la longitud de onda.

7



- 1 Sin desplazamiento de la dispersión
- 2 Con desplazamiento de la dispersión
- 3 Con dispersión plana

Figura 3.11

Dispersión cromática en función de la longitud de onda

Clase 1 sin desplazamiento de la dispersión

Perfil escalonado normal (simple step-index o matched cladding).

Perfil escalonado con índice de refracción rebajado en el (depressed cladding).



Figura 3.12

Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas sin desplazamiento de la dispersión

Clase 2 desplazamiento de la dispersión:

- a) Perfil segmentado con núcleo triangular (segmented core)
- b) Perfil triangular (triangular profile)

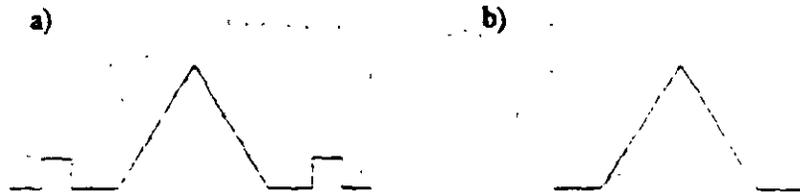


Figura 3.13

Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas con desplazamiento de la dispersión

Clase 3 con dispersión plana

- a) Perfil segmentado con 4 escalones del índice de refracción en el recubrimiento (cuadruple clad)
- b) Perfil W (double clad)

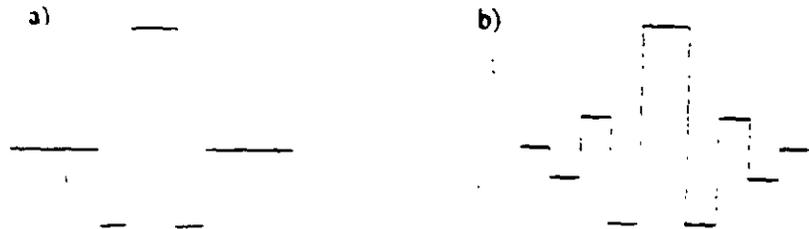
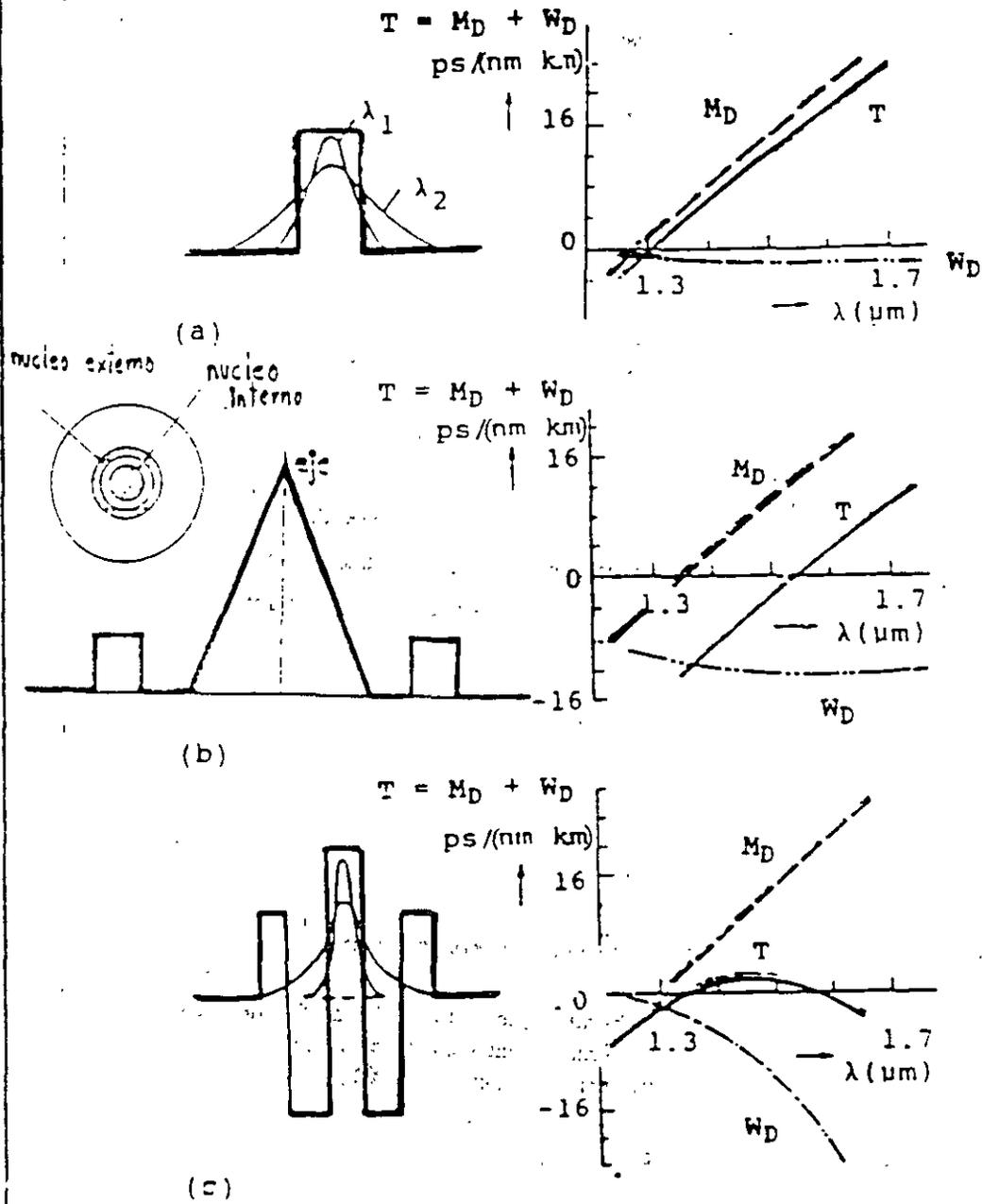


Figura 3.14

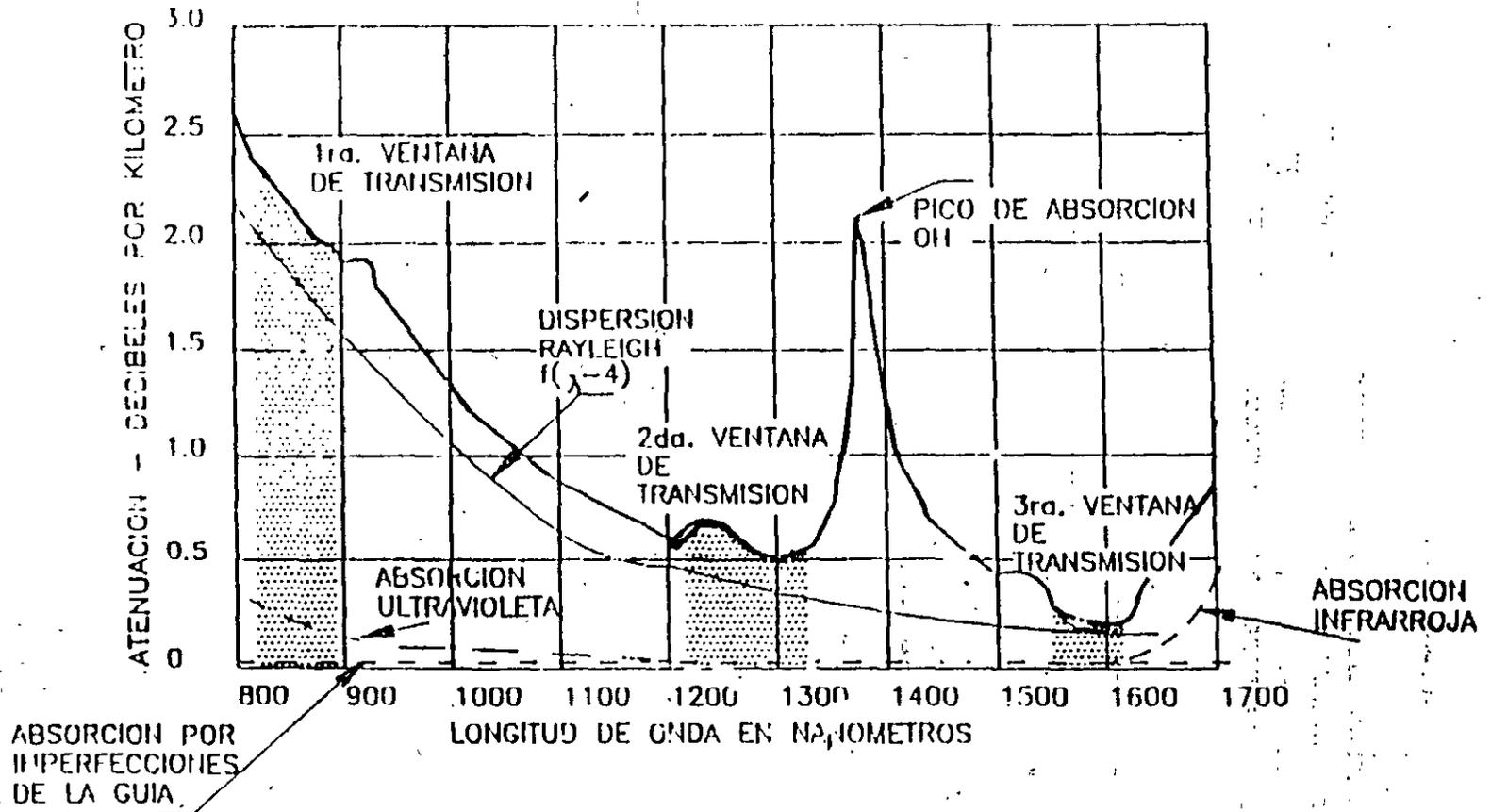
Estructuras de conductores de fibra óptica con dispersión plana



- (A) FIBRA MONOMODO CONVENCIONAL
- (B) " " DE DISPERSION CORRIDA
- (C) " " DE DISPERSION APLANADA



ATENUACION DE UNA FIBRA OPTICA CON RESPECTO A LA LONGITUD DE ONDA



43