



**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.

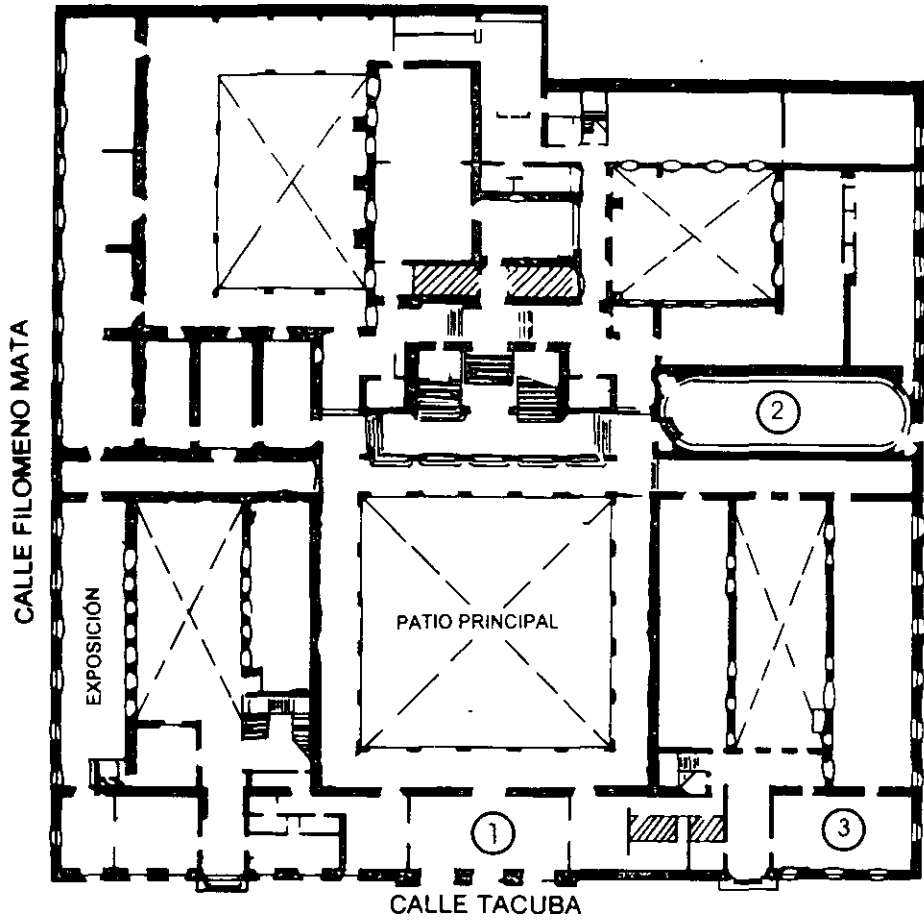
Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

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.

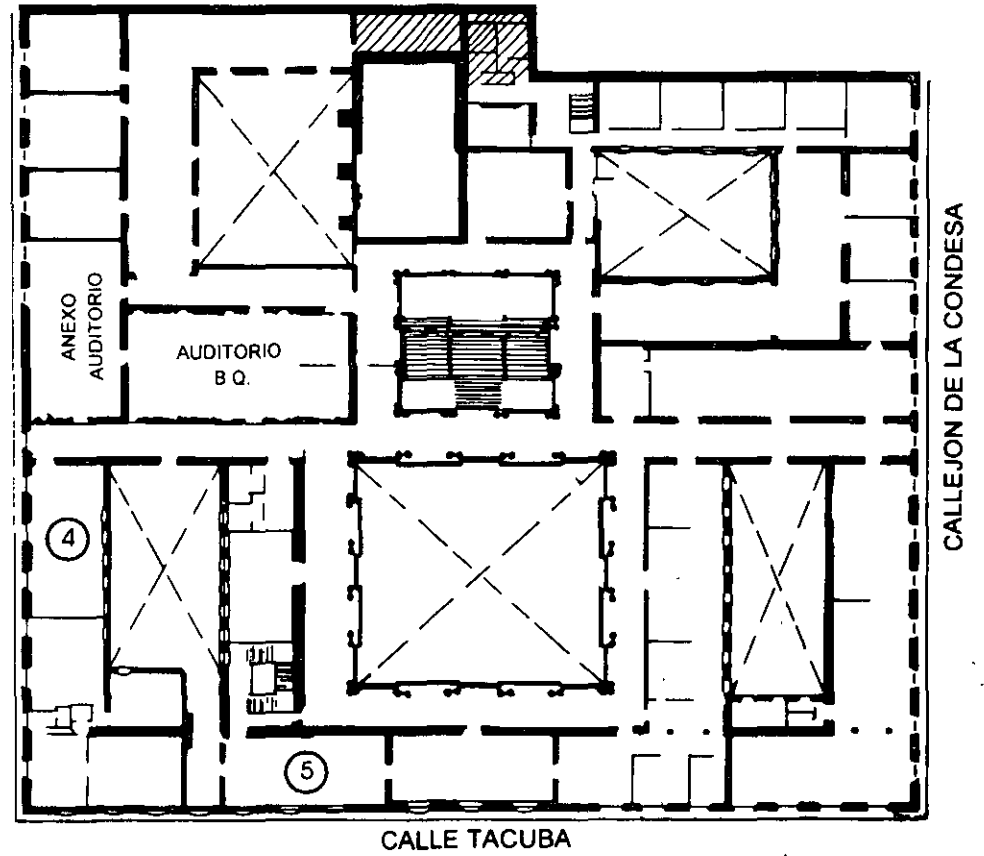
Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

**Atentamente
División de Educación Continua.**

PALACIO DE MINERIA

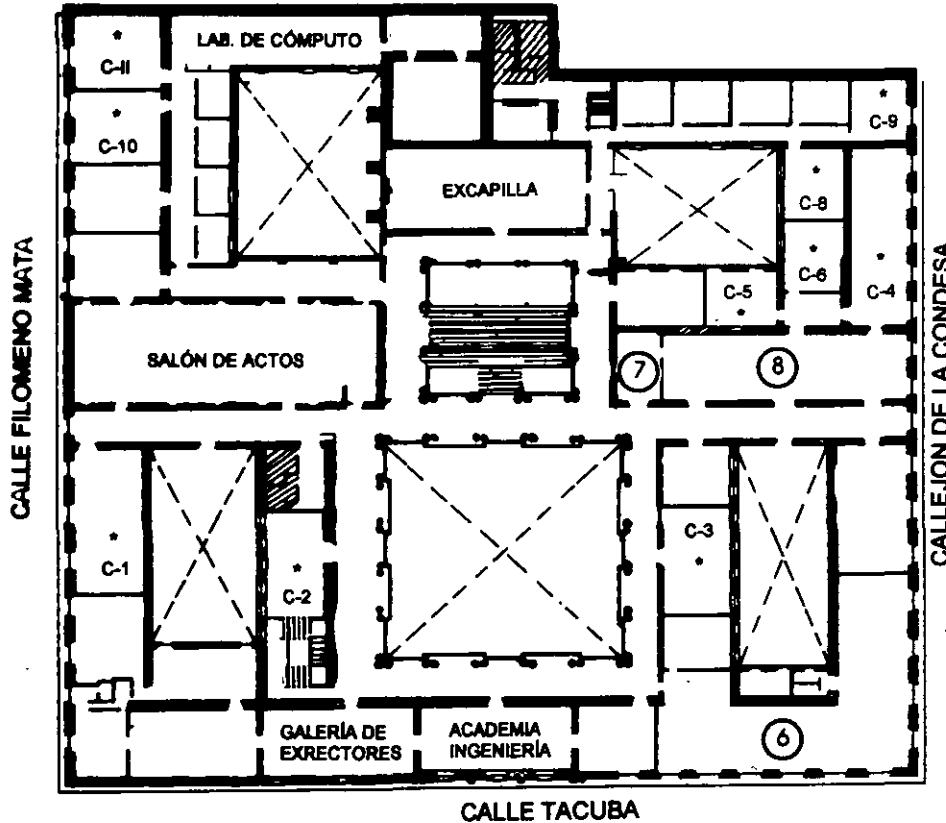


PLANTA BAJA



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III: TELECOMUNICACIONES VÍA
FIBRAS OPTICAS**

TEMA

PROPAGACION EN FIBRAS OPTICAS

**EXPOSITOR: DR. FERNANDO MARTINEZ P.
PALACIO DE MINERIA
JUNIO 2001**



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 espaciamiento 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 medica, en control de procesos, plantas eléctricas, aereoespacio, etc.



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

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

Estructura de una fibra óptica

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

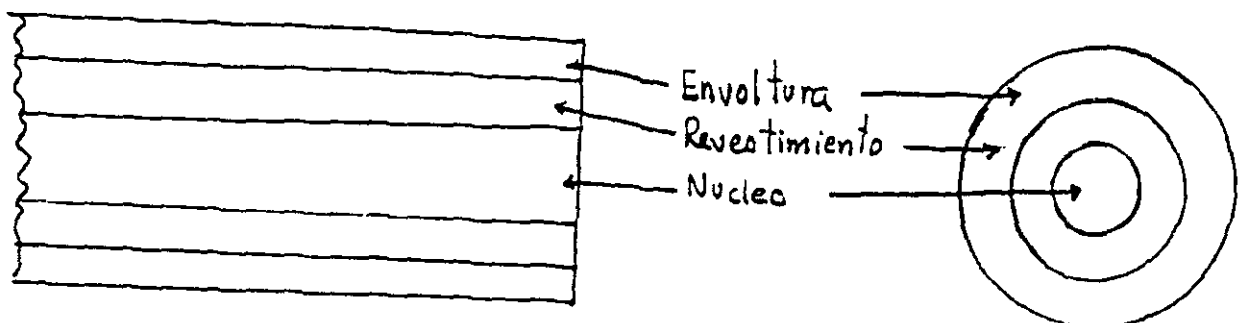


Fig. 1.- Estructura física de una fibra óptica.

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



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

TEORIA DE TRANSMISION DE RAYOS

Reflexión interna total

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

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

$$n = c/v$$

(1)

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

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

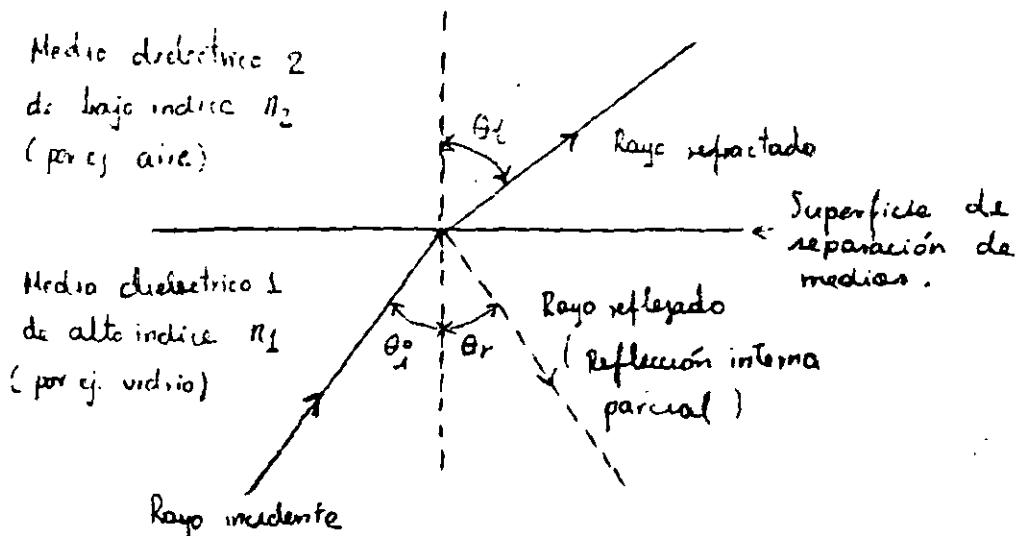


Fig. 2.2 - Refracción de rayos de luz que inciden en una interfaz de un medio de alto índice de refracción a uno de bajo índice de refracción, (por. ej. vidrio - aire).



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

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

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

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

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

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_t es mayor que θ_i (Un índice de refracción n_2 mayor que n_1 implicaría que θ_t 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

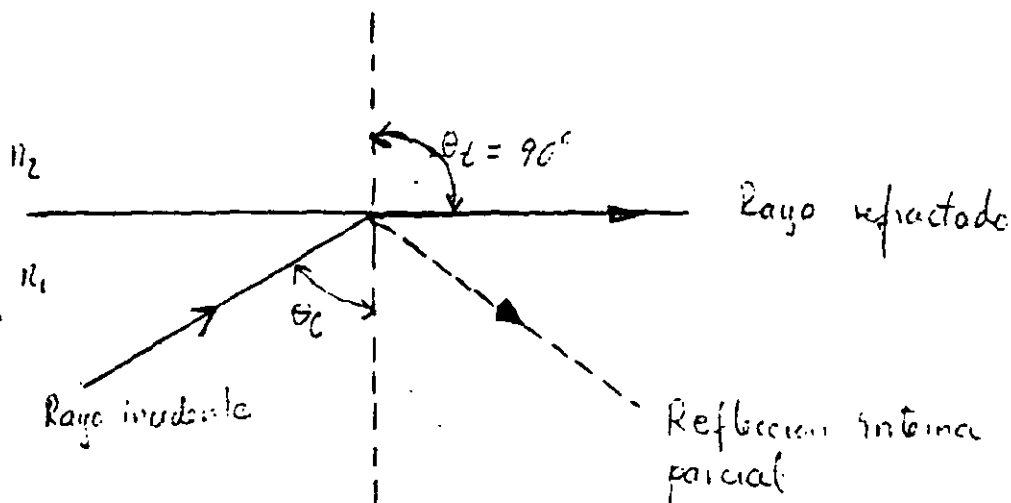


Fig. 3.- Caso límite de refracción que muestra el rayo de incidencia el ángulo crítico θ_c .

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.

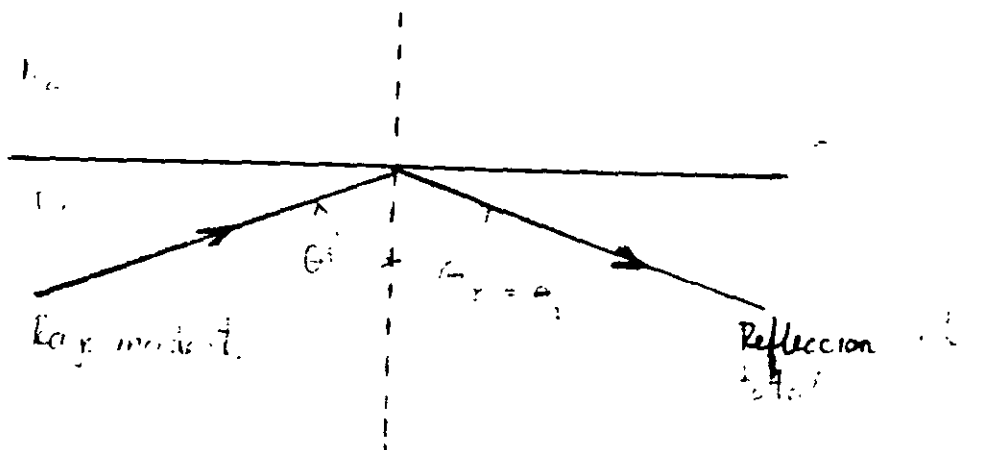


Figura 4.- Reflexión interna total cuando $\theta_i > \theta_a$



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.

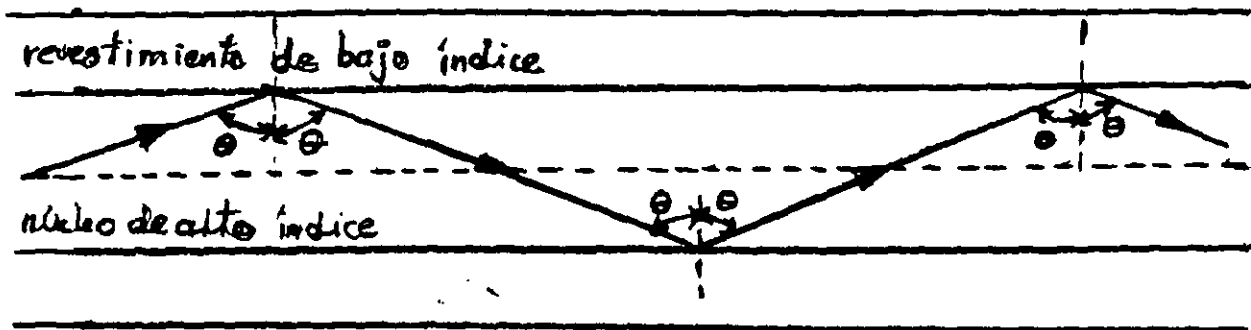


Fig.5 Transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica ideal.

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.

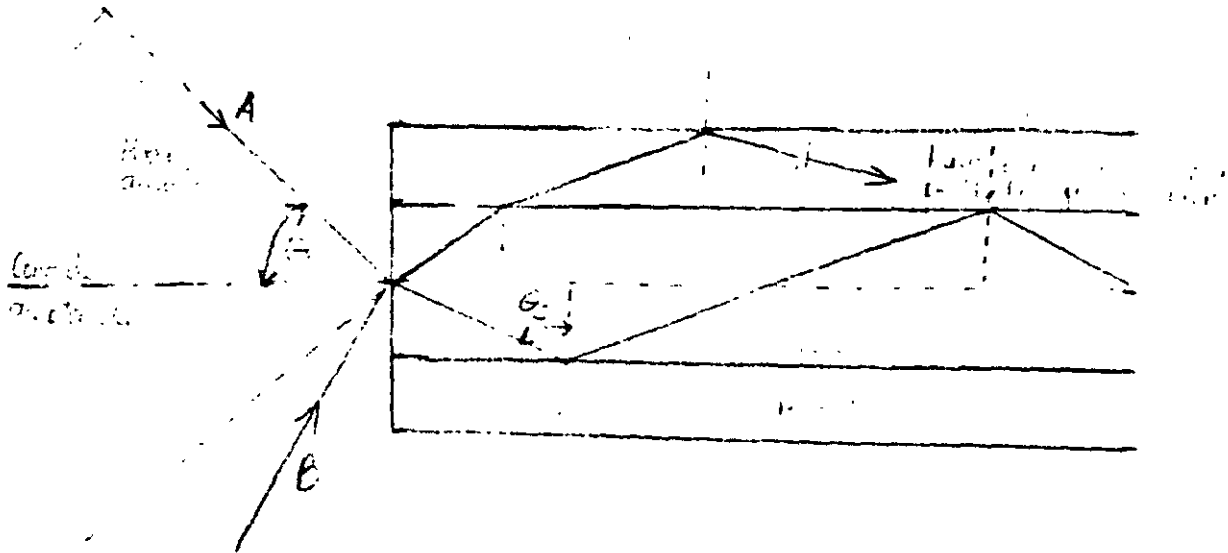
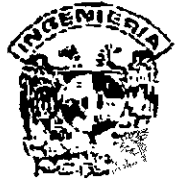


Fig. 6.- Angulo de aceptancia.

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 .

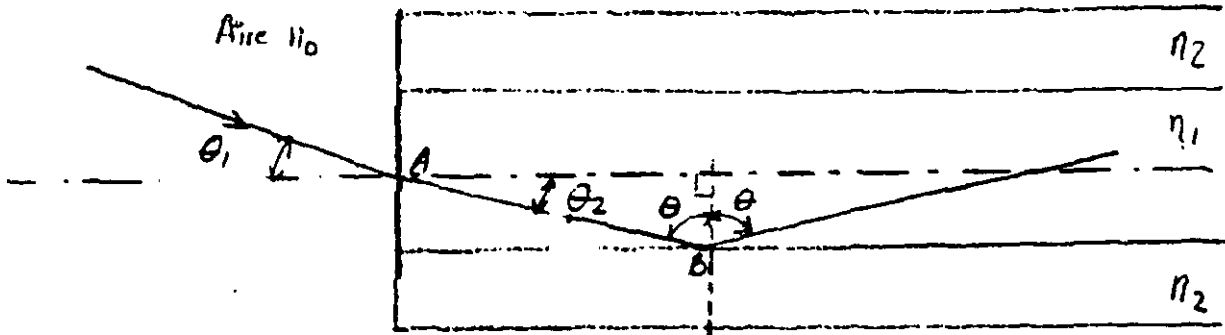


Fig. 7.- Trayectoria de un rayo meridional acoplado a una fibra óptica con un ángulo menor al ángulo de aceptación de la fibra.

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

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1.47}{1.50} \right)$$

$$= 78.5^\circ$$

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

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

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

$$= 0.30$$

(c) 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.

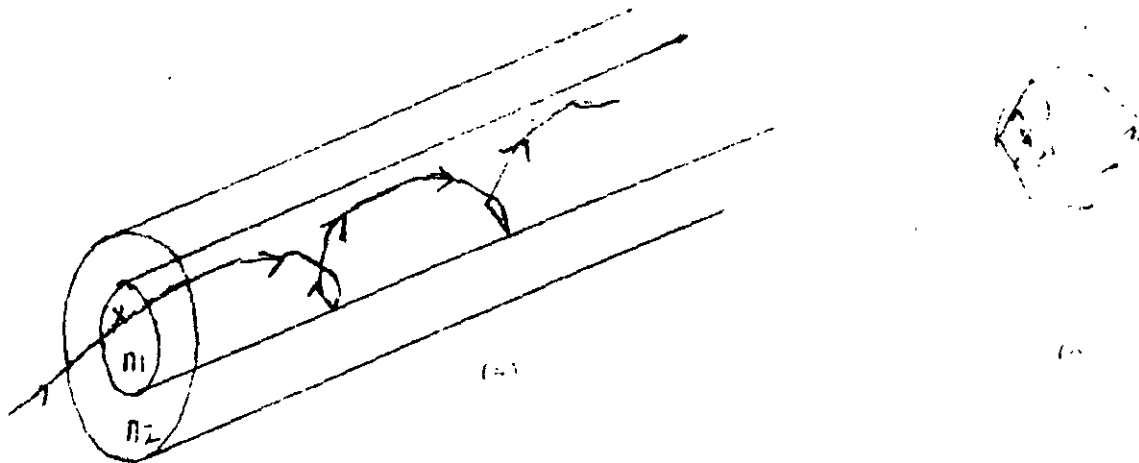


Figura 8.- (a) Trayectoria helicoidal seguida por un rayo oblicuo en una fibra óptica; (b) vista transversal de la fibra.

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.

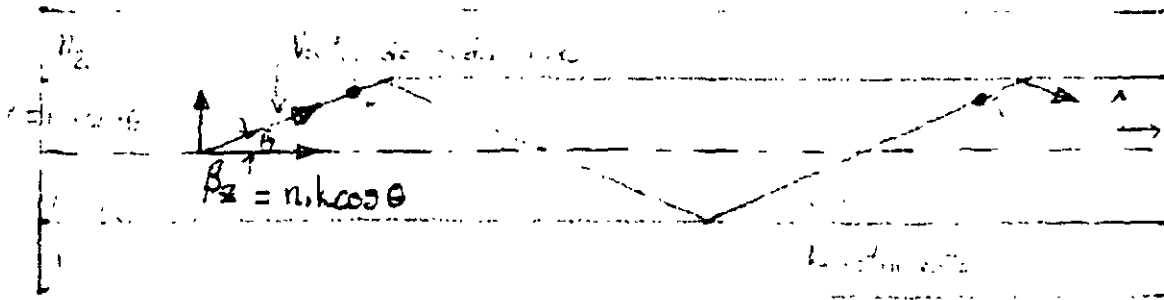


Figura 9.- Propagación de una onda plana en una guía. El vector de onda corresponde a un rayo equivalente.

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 , 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 .

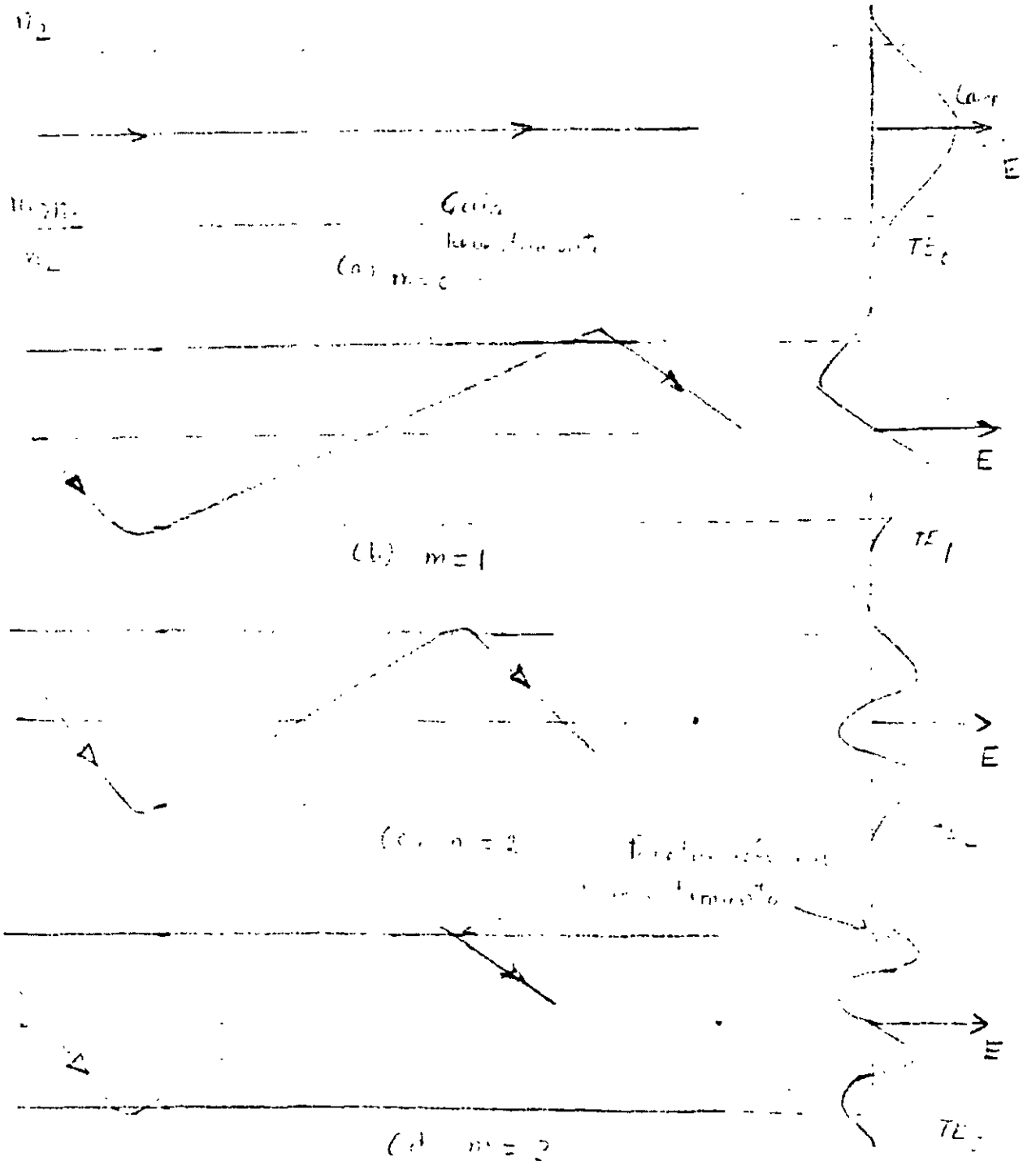


Figura 10. Modelo físico que muestra la propagación de rayos y los correspondientes



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.

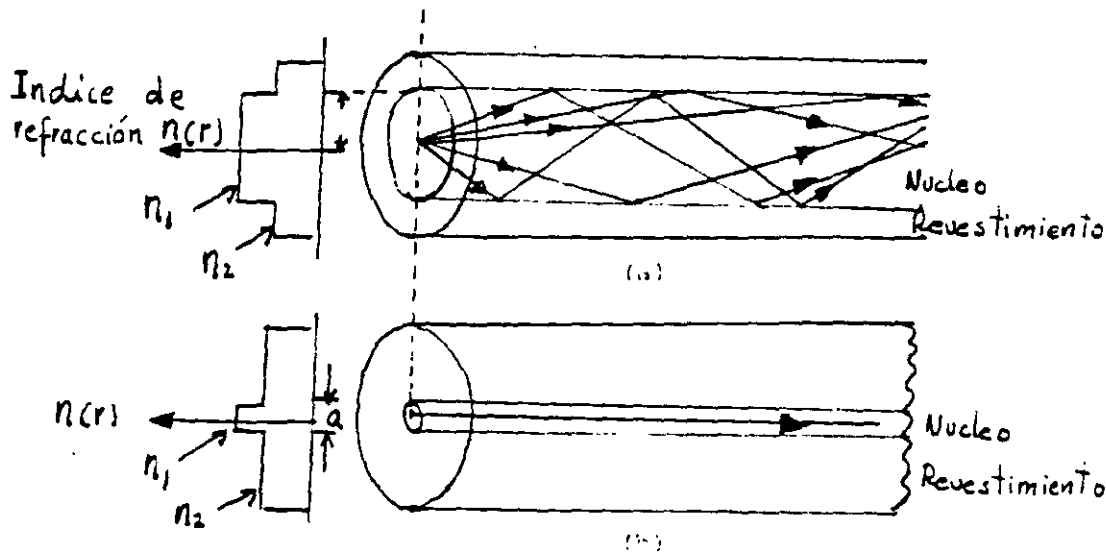


Fig. 11.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos para fibras de índice escalonado (a) fibra de índice escalonado multimodo y (b) fibra de índice escalonado unimodo.

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

Fibras multimodales de índice escalonado.

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



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

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

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

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

Ejemplo: Una fibra óptica con un diámetro de núcleo de 80 μm y una diferencia relativa de índice de refracción de 1.5% opera a la longitud de onda de 0.85 μm . 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.

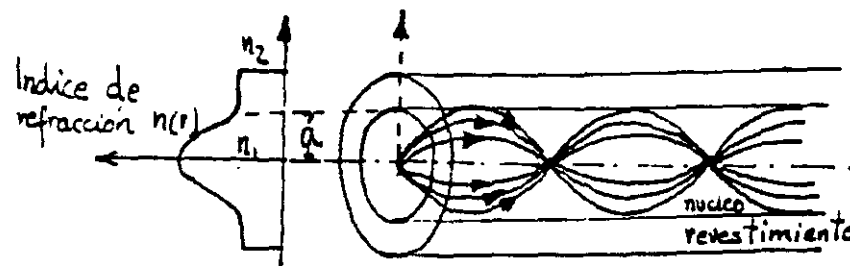


Fig. 12.- Perfil de índice de refracción y transmisión de rayos en una fibra de índice gradual multimodal.

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.

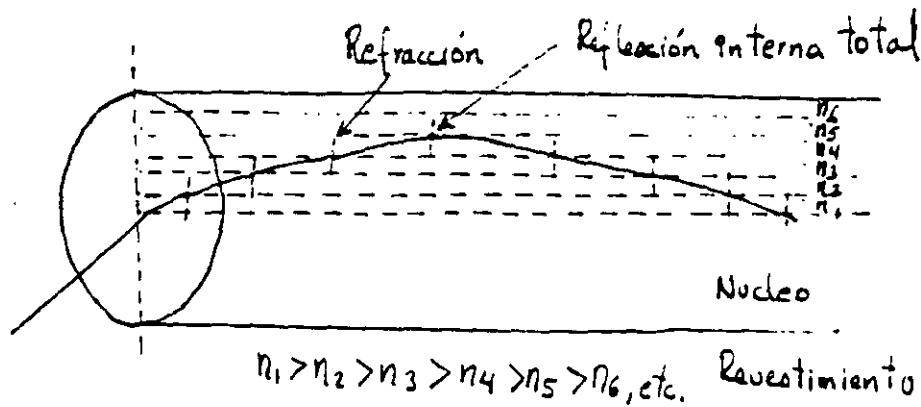


Figura 13.- Diagrama que muestra la refracción en las diversas interfaces de alto a bajo índice en una fibra. de índice gradual lo que da una trayectoria curva del rayo.

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



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

“Tres décadas de orgullosa excelencia” 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III: TELECOMUNICACIONES VÍA
FIBRAS OPTICAS**

TEMA

DISPERSION POR POLARIZACION DE MODO P.M.D.

**EXPOSITOR: ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA
PALACIO DE MINERIA
JUNIO 2001**

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

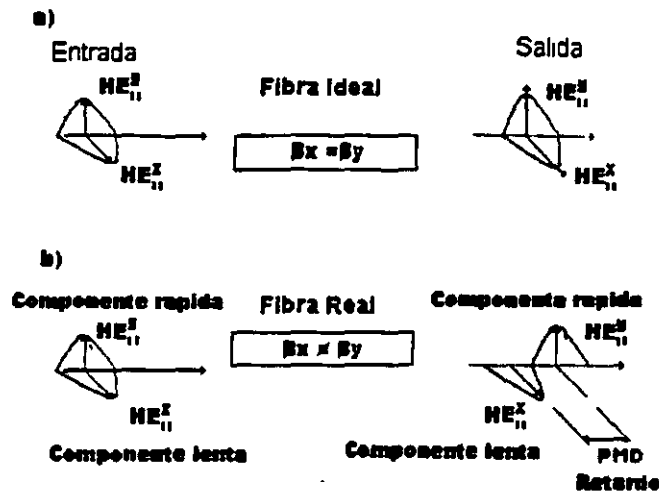


Fig. 1 Propagación en una fibra monomodo de un pulso de luz polarizado en X-Y para:
 a) Una fibra ideal b) Una fibra real

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 1 psKm^{-1} para fibras convencionales y hasta más de 1 nsKm^{-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 $B_i(\text{max})$ en relación con la dispersión por polarización de modo se puede calcular de:

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

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 , $\Delta\phi = \Omega\Delta t$ 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_0 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

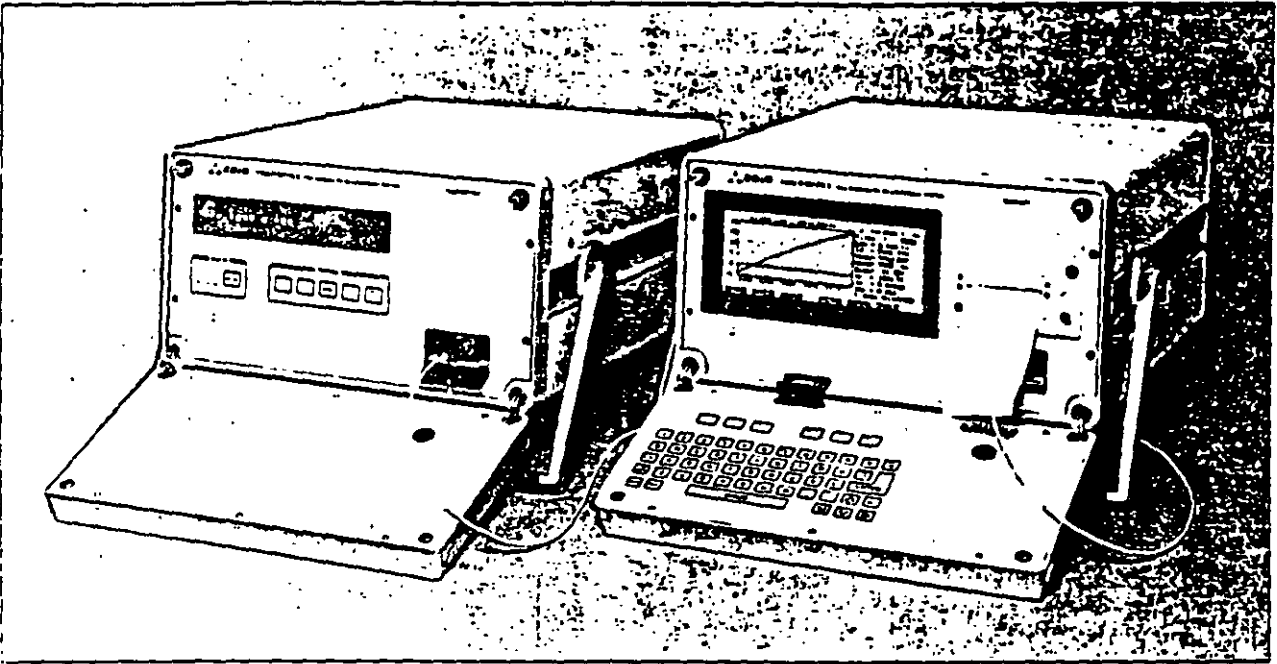
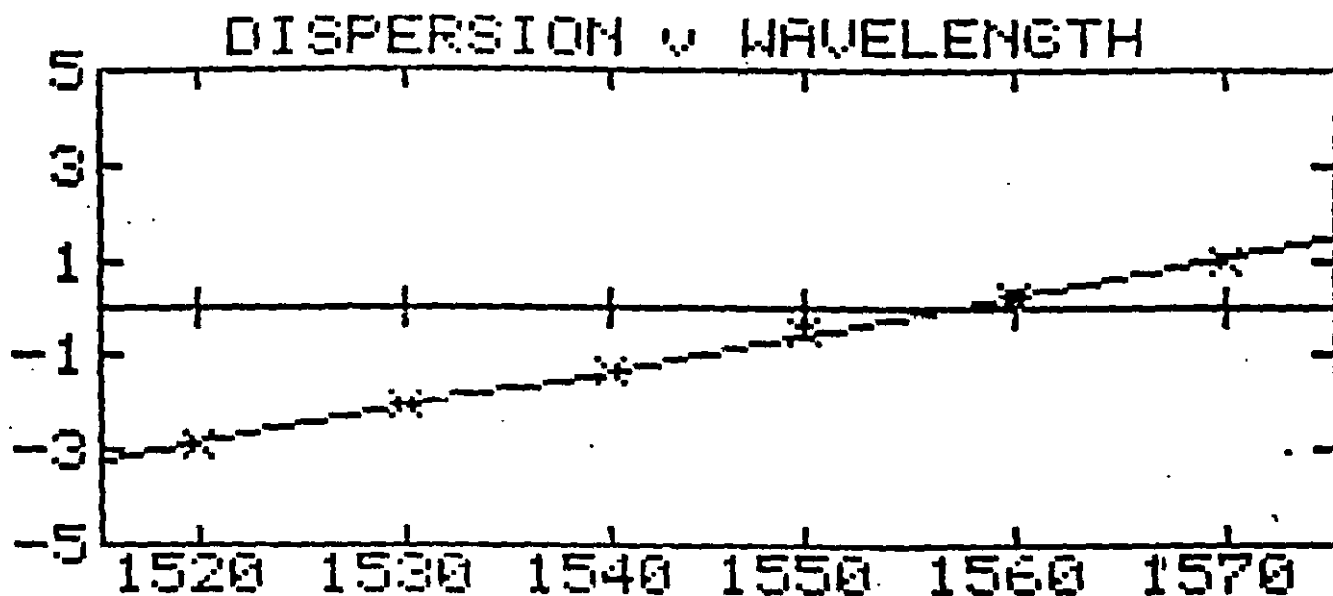


Figura 2 .- Equipo para medir dispersión cromática FD4 de EG&G.

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 nm	DISPERSION 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 = 1556.982nm. SEE = 0.013

Figura 3.- Medición de dispersión cromática.

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

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

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

1.3.3.- Técnicas de medición de la PMD

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

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

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

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

1.3.2.- Método interferométrico

En la figura 4 se muestra la configuración típica del interferómetro

Método interferométrico

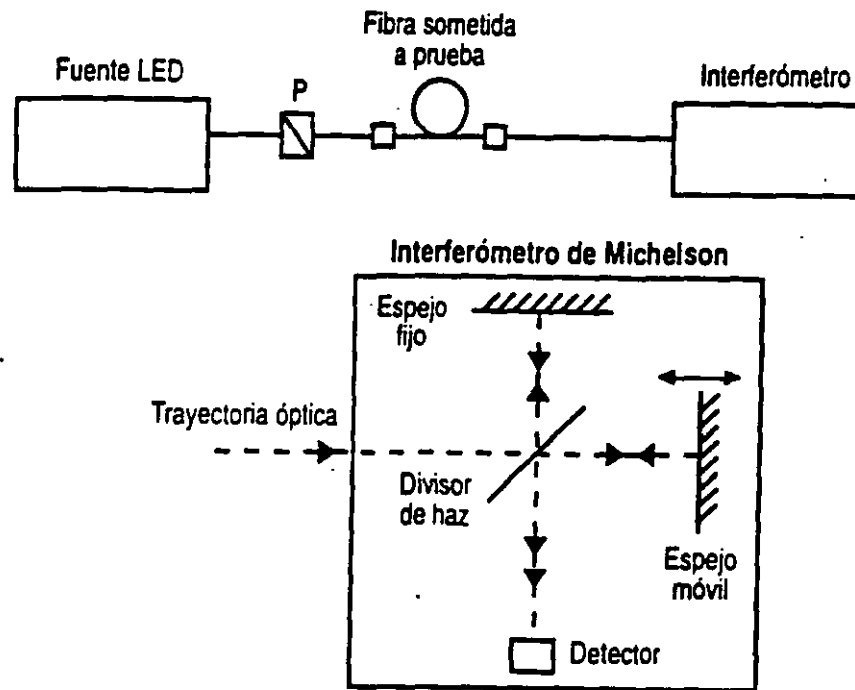


Figura 4.- Medición de la PMD por el método interferométrico.

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

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

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

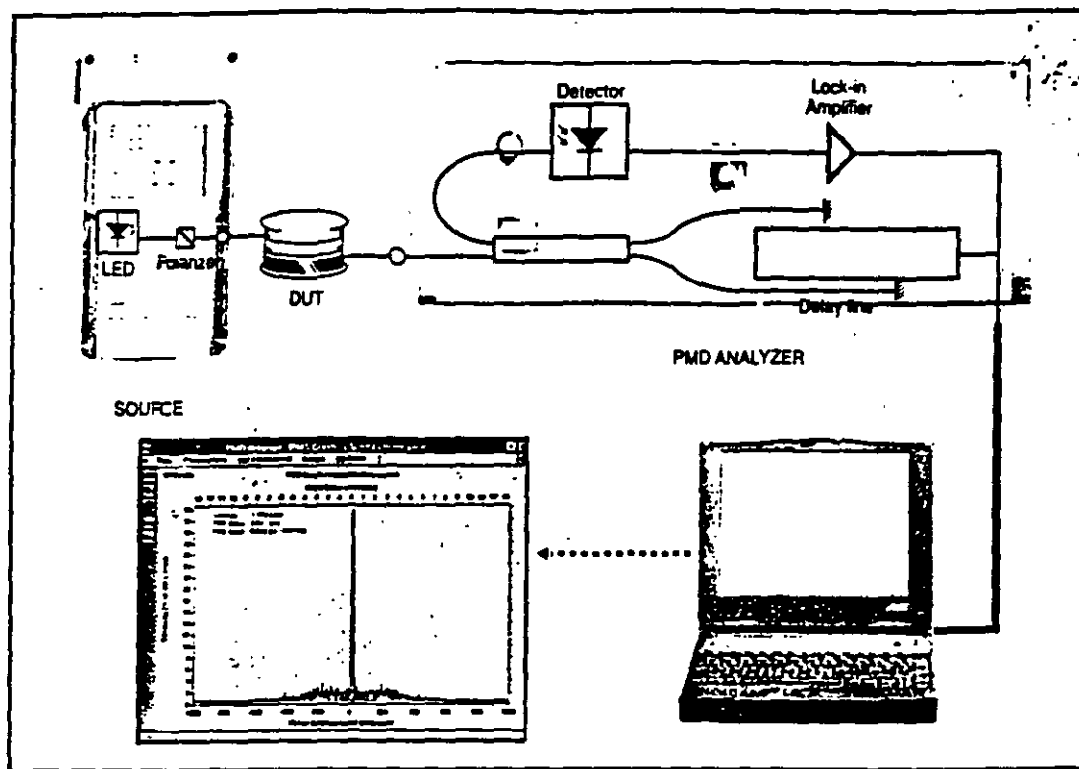
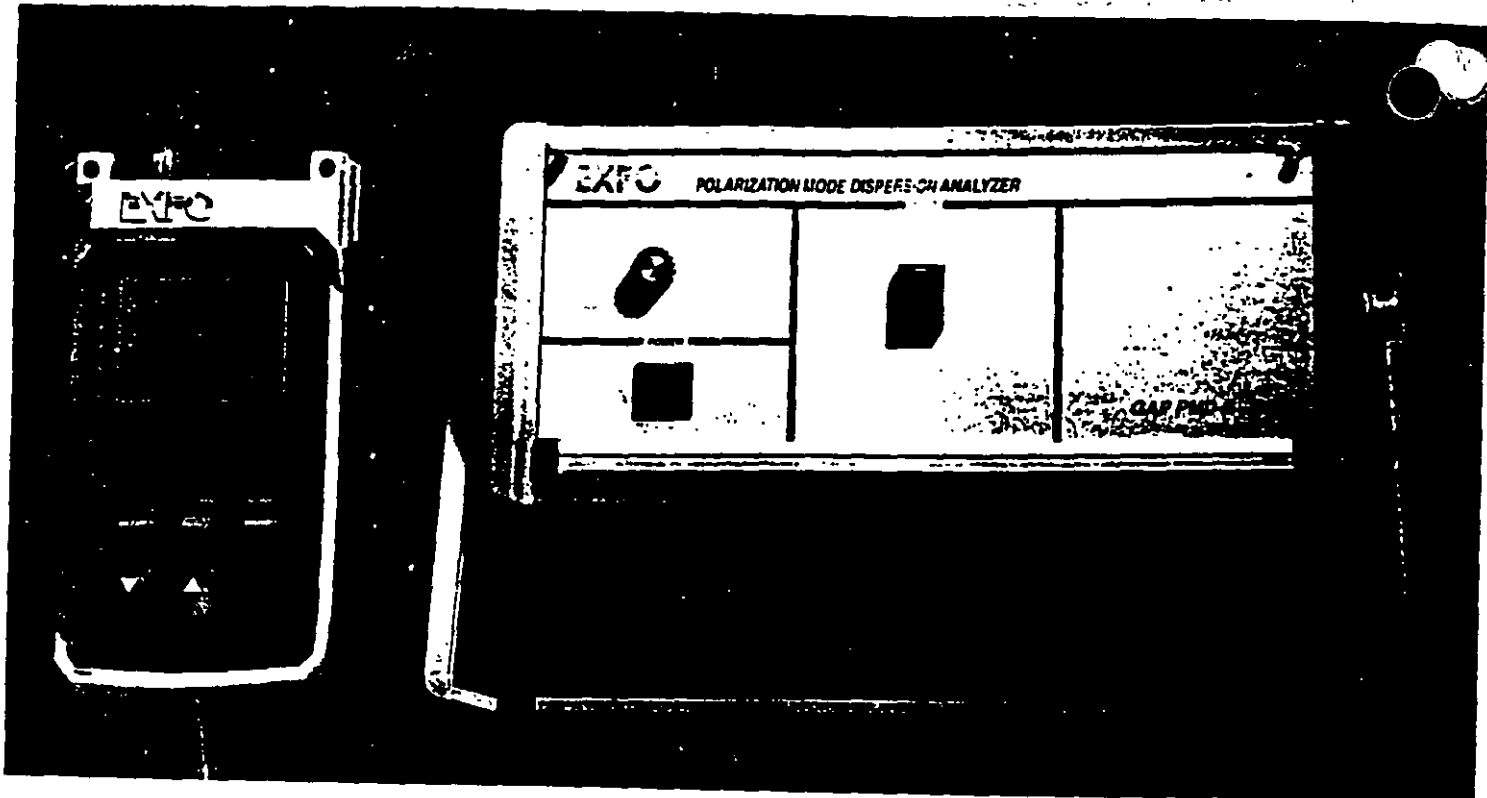


Figura 5.- Arreglo para medir PMD

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

- Portátil y resistente a la vibración .
- Rango dinámico alto 40dB.
- Tiempo de medición corto <15 s .
- Gran capacidad de medición de valores PMD 0.06 ps a 100 ps.
- Excelente repetibilidad ± 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 INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

“Tres décadas de orgullosa excelencia” 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III: TELECOMUNICACIONES VÍA
FIBRAS OPTICAS**

TEMA

**EMPALME Y CONEXIÓN Y MEDICION EN ATENUACIÓN
EN FIBRA OPTICA**

**EXPOSITOR: ING. FERNANDO NAVARRETE MONTES DE OCA
PALACIO DE MINERIA
JUNIO 2001**

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





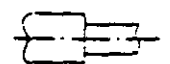
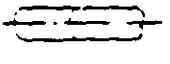
El objetivo de la conexión óptica es acoplar o transferir potencia óptica de un punto a otro. Sin embargo, en la transferencia de potencia existe pérdida causada en el elemento de conexión, estas pérdidas se clasifican en:

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 mostrado en una pantalla.

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

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

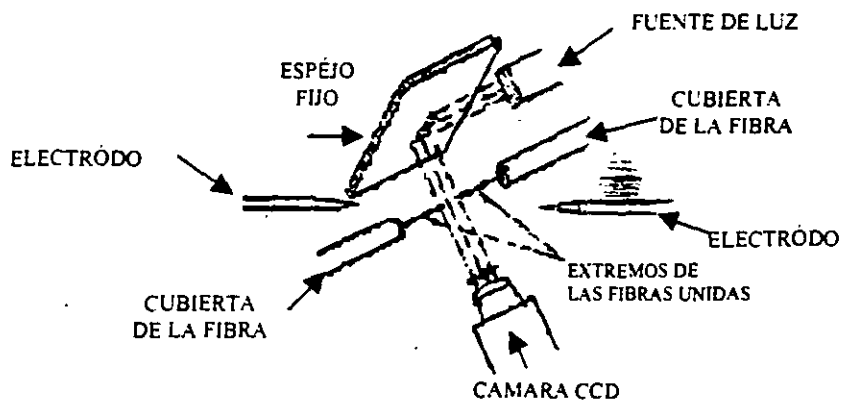


Figura 1 Principio de empalme por arco de fusión.

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

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

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

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

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

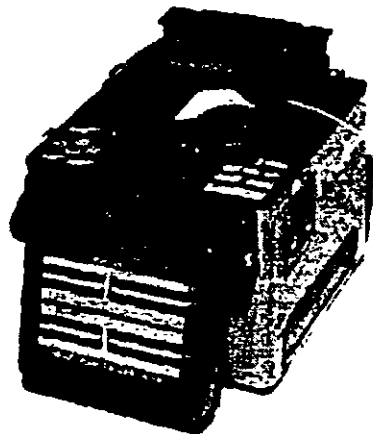


Figura 2 Empalmadora Fujikura modelo FSM-40.

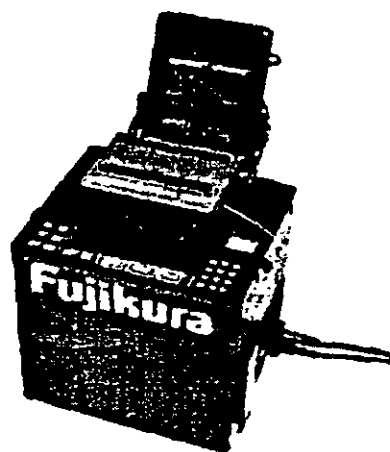


Figura 3 Empalmadora Fujikura modelo FSM-30 PF.



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

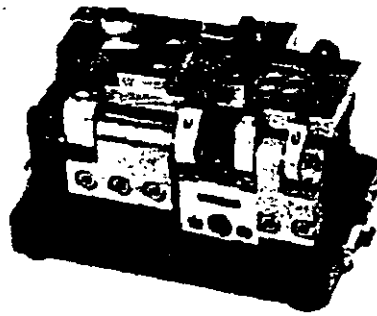


Figura 5. Limpiadora de cubierta de fibra óptica , marca Fujikura modelo HTS-11.

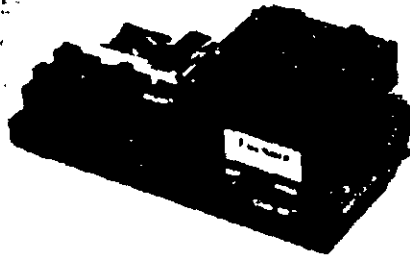


Figura 6 Cortadora de fibra óptica , marca Fujikura modelo CT-03HT-05.



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

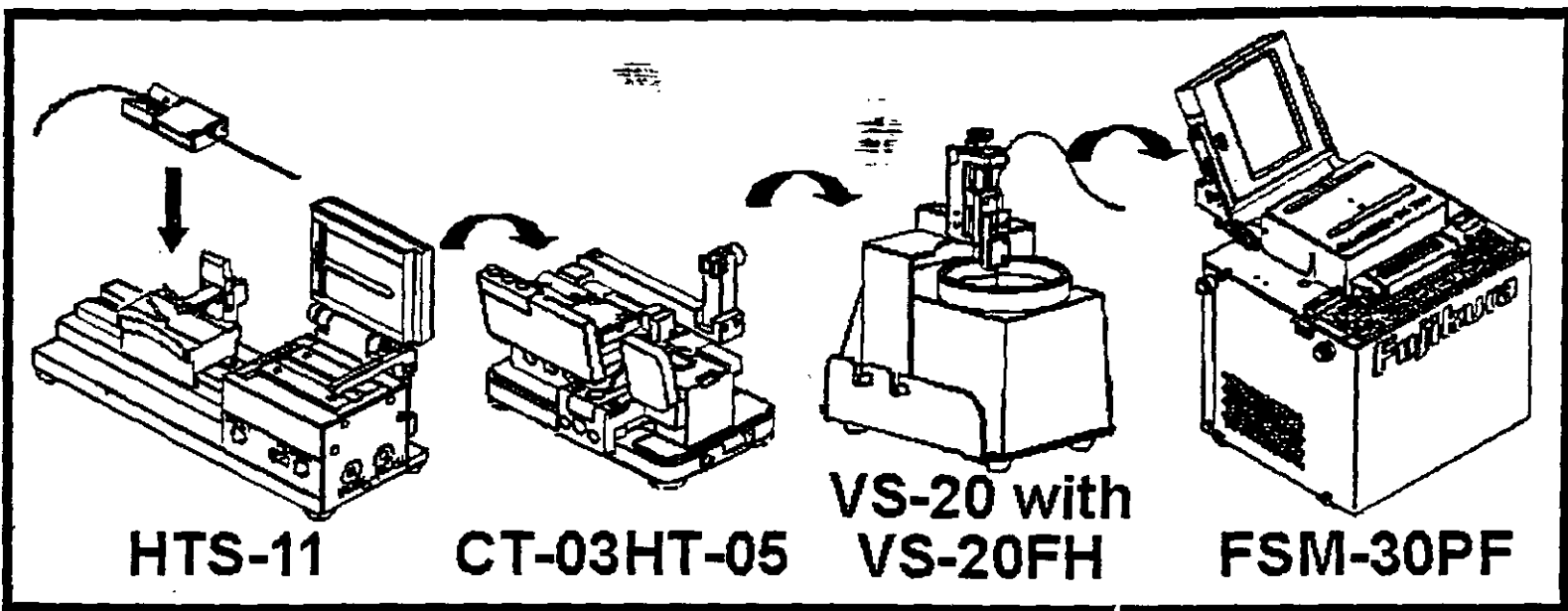
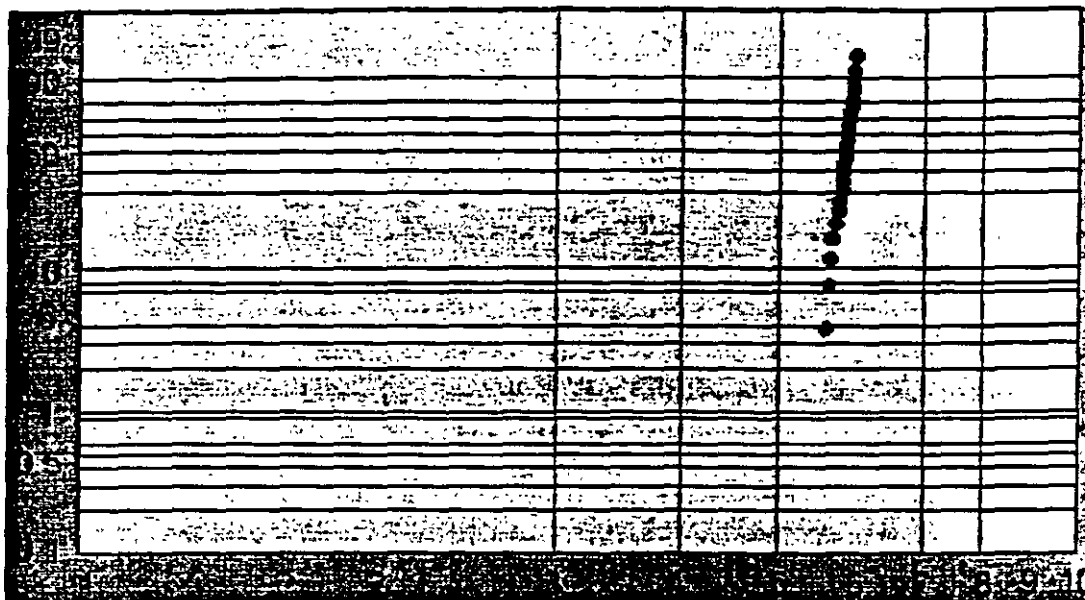


Figura 8 Vista detallada del proceso de elaboración de empalmes de fibra óptica.

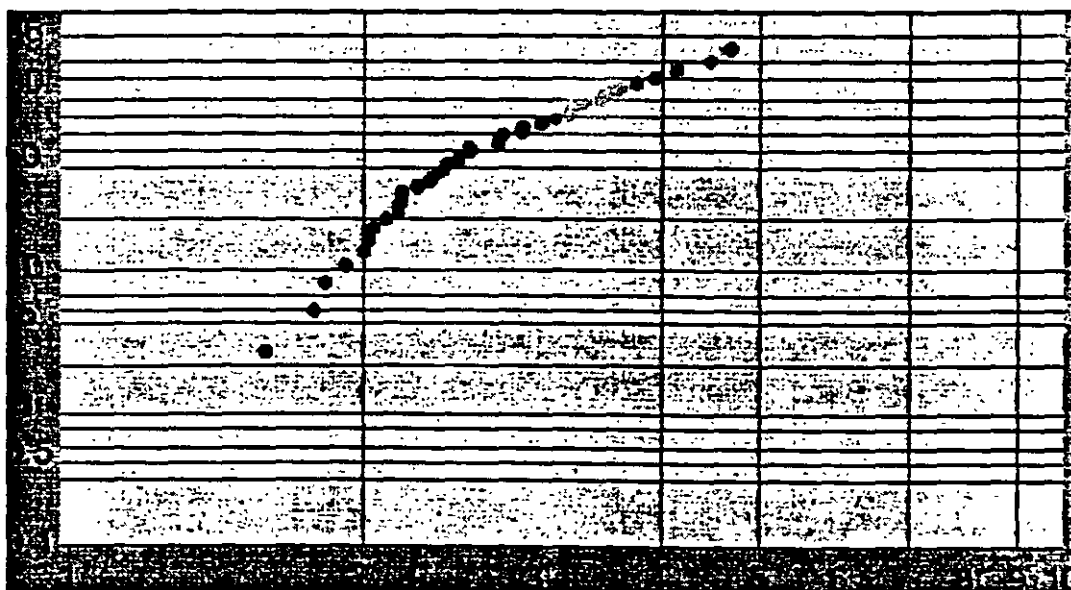
Probabilidad de ruptura[%]



Fuerza de tensión de ruptura [Gpa]

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

Probabilidad de ruptura[%]



Fuerza de tensión de ruptura [Gpa]

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

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

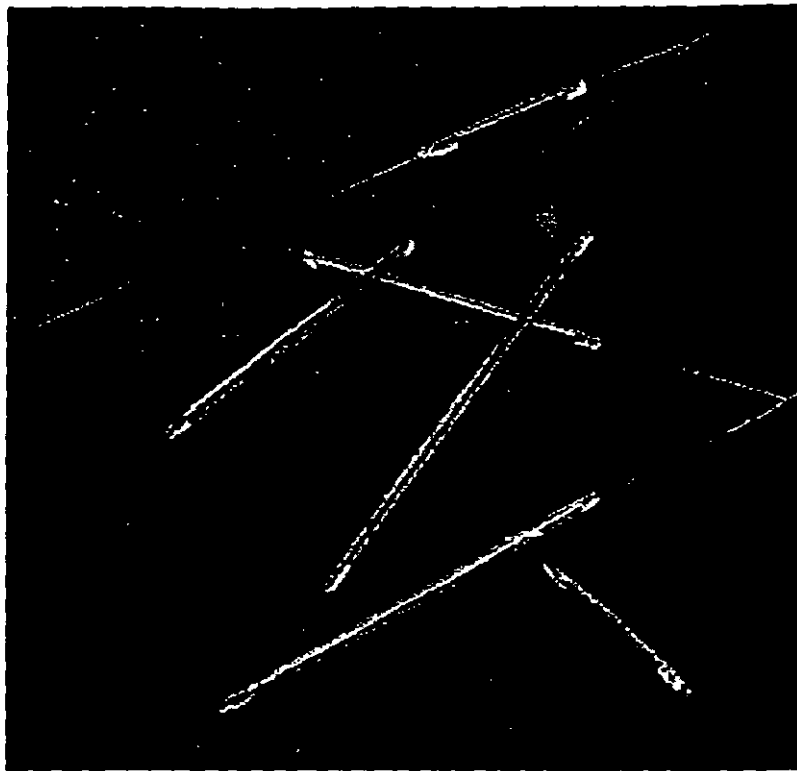


Figura 11 Empalmes protegidos por SMOUVs.

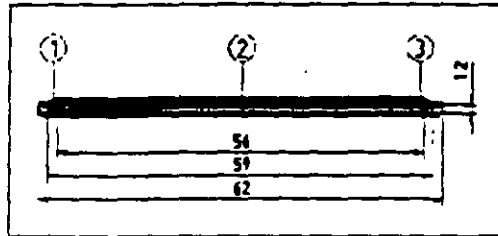
La manga protectora de empalme SMOUV-1120 provee protección mecánica y ambiental para empalmes por fusión de una sola fibra (como se muestra en la figura 11).

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

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

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

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.

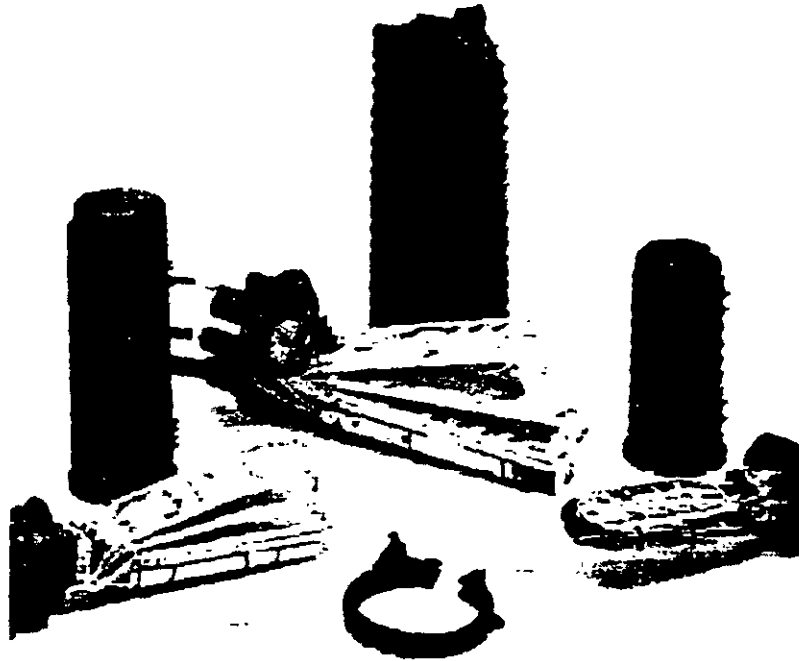


Figura 13 Cajas de empalme de Raychem.

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 ologada, 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 "pantalón" de la fibra(ver figura 15)

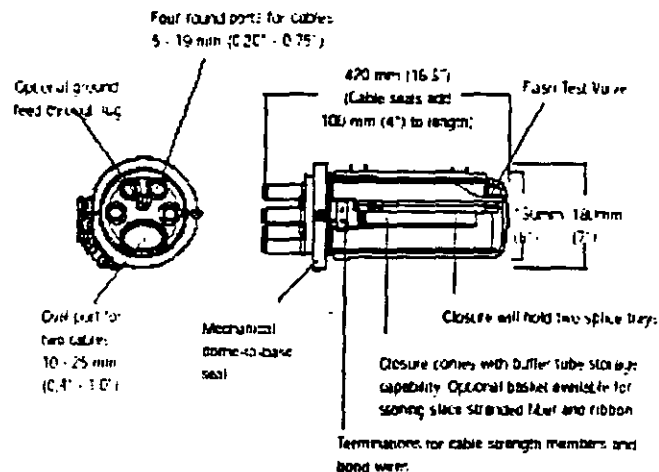


Figura 14 Elementos que componen la caja de empalme.

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

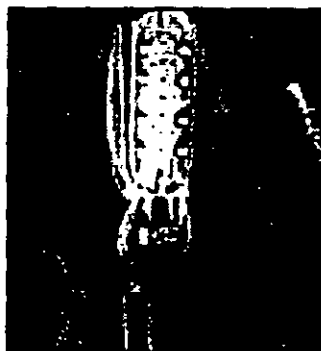


Figura 15 Charolas de empalme sin protección exterior.

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.

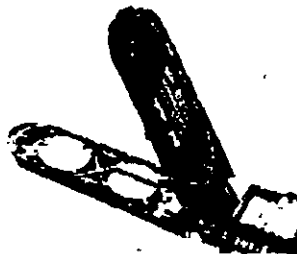


Figura 18 Contenedor de empalmes con charolas de alojamiento de fibras ópticas.



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

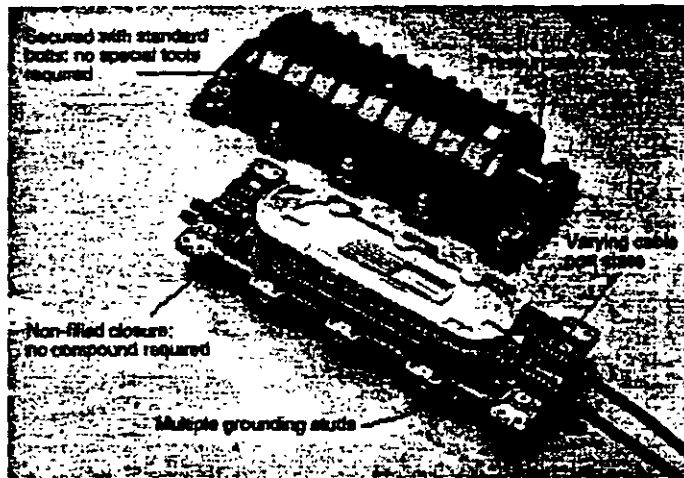


Figura 20 Contenedor de empalmes listo para ser cerrado.

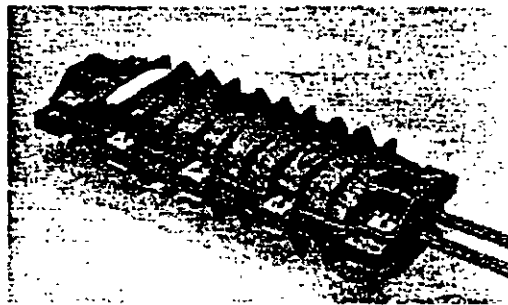


Figura 21 Contenedor de empalmes cerrado herméticamente.



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.

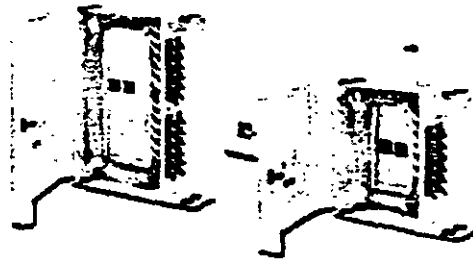


Figura 24 Distribuidor de fibras ópticas empotrado en pared.



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

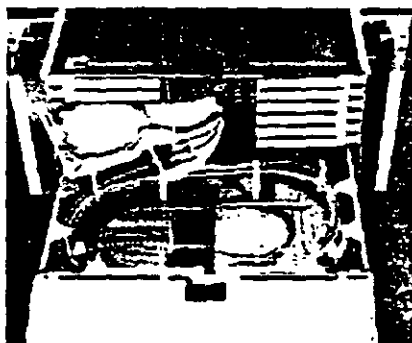


Figura 26 Distribuidor de pequeñas cantidades de fibras ópticas en disposición de rack universal de 21".



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.

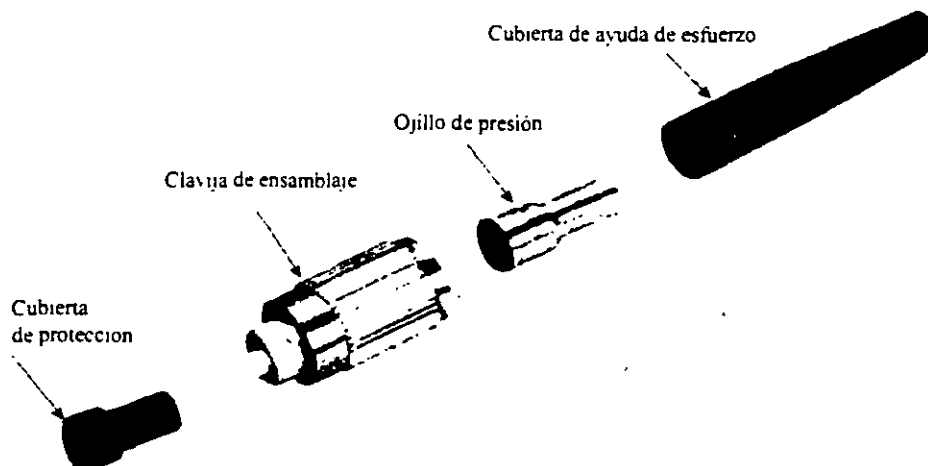


Figura 28 Conector FC/PC.

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)

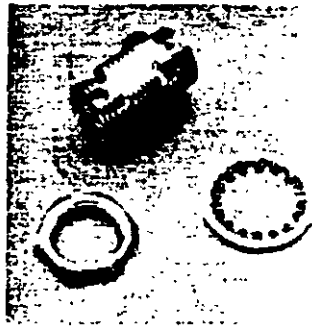


Figura 29. Centrador de montaje tipo redondo



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_o , finalmente la pérdida total del enlace está dada por:

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

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 $P_o(dB)$.

13

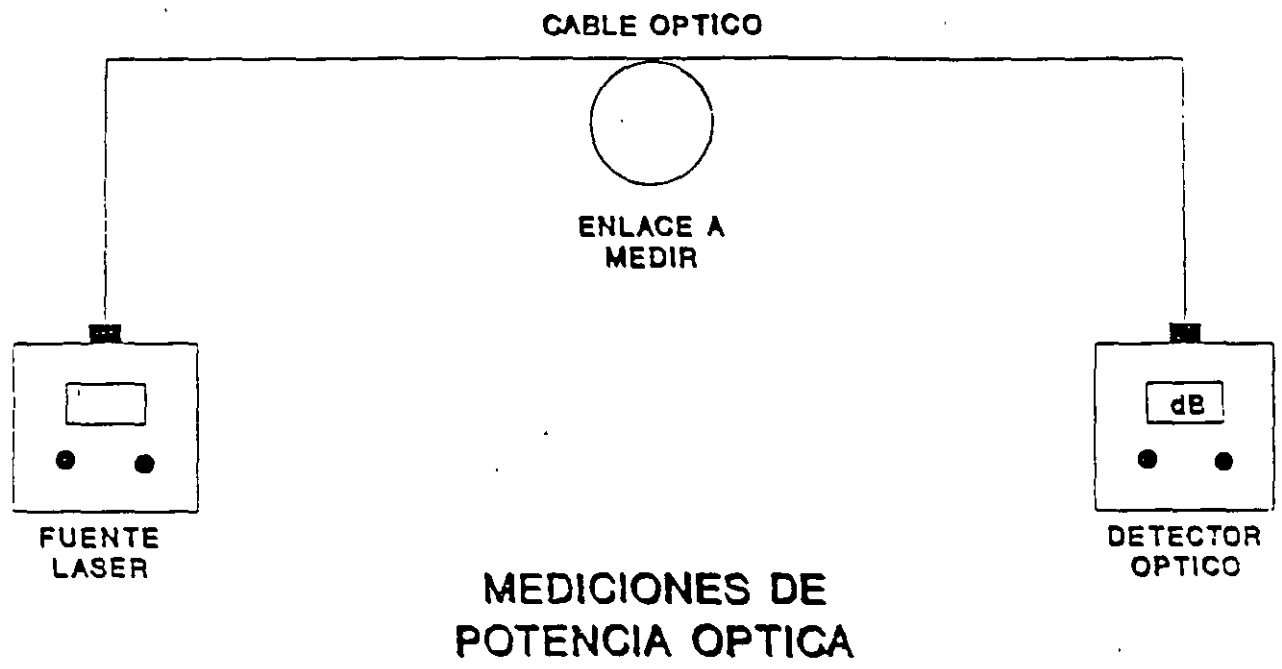
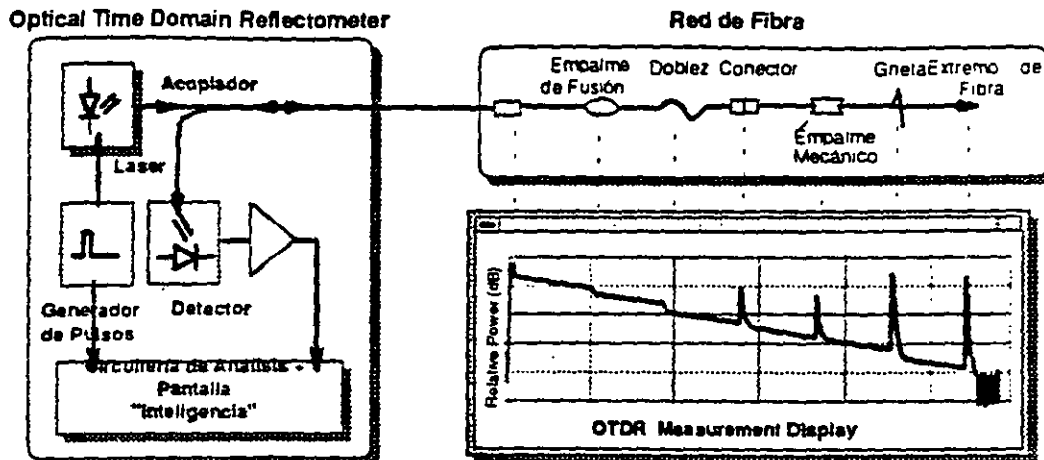


FIG. 1

Términos Básicos - OTDR



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



Optical Time Domain Reflectometer
 8.34 Fiber Optic Test
 Pág. 20
 9/88

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:

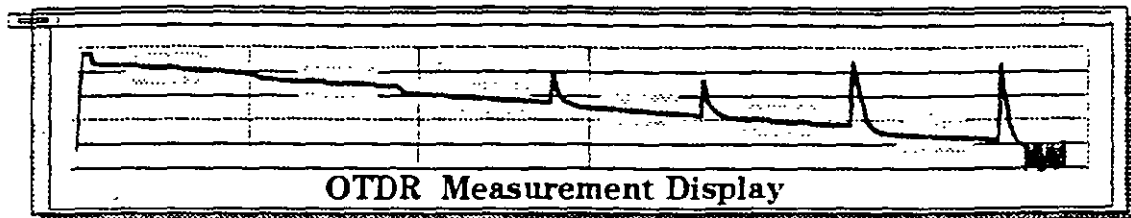
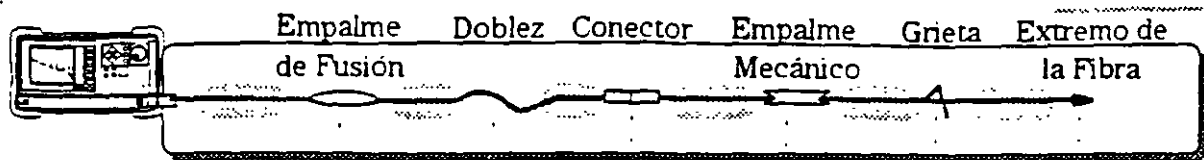
- Distance: El lugar donde se encuentran las ocurrencias de los eventos y el final de la fibra
- LOSS: Puede ser la pérdida en un empalme ó la pérdida total entre los extremos del enlace
- ATTENUATION: De la fibra en el enlace
- REFLECTION: El tamaño de la reflexión (ó pérdida por retorno) de un evento,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

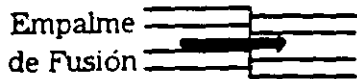
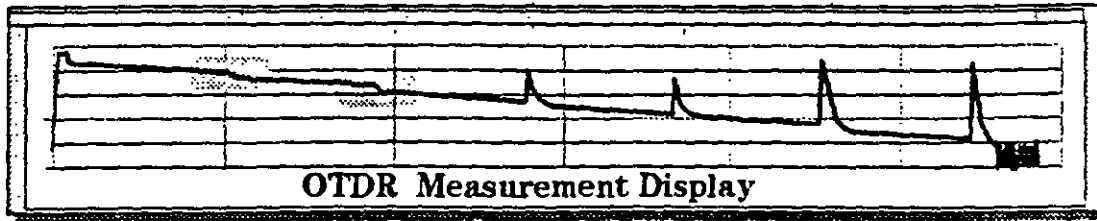
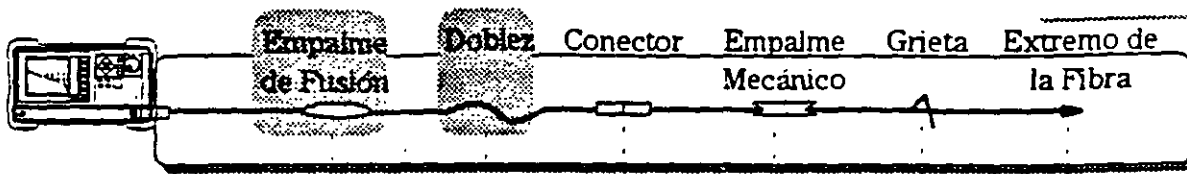
1988-1989
LIT 100-100-0000

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

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

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

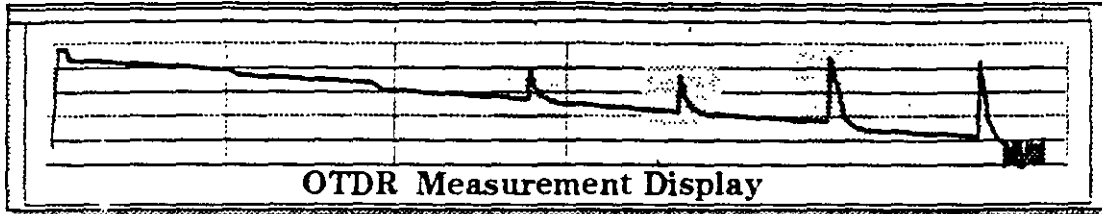
Términos Básicos - Eventos No-Reflectivos



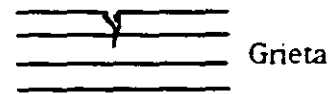
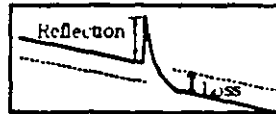
Los empalmes de fusión y los dobleces causan pérdidas pero no reflexiones. Sus respuestas son similares en la pantalla del OTDR.

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

Términos Básicos - Eventos Reflectivos

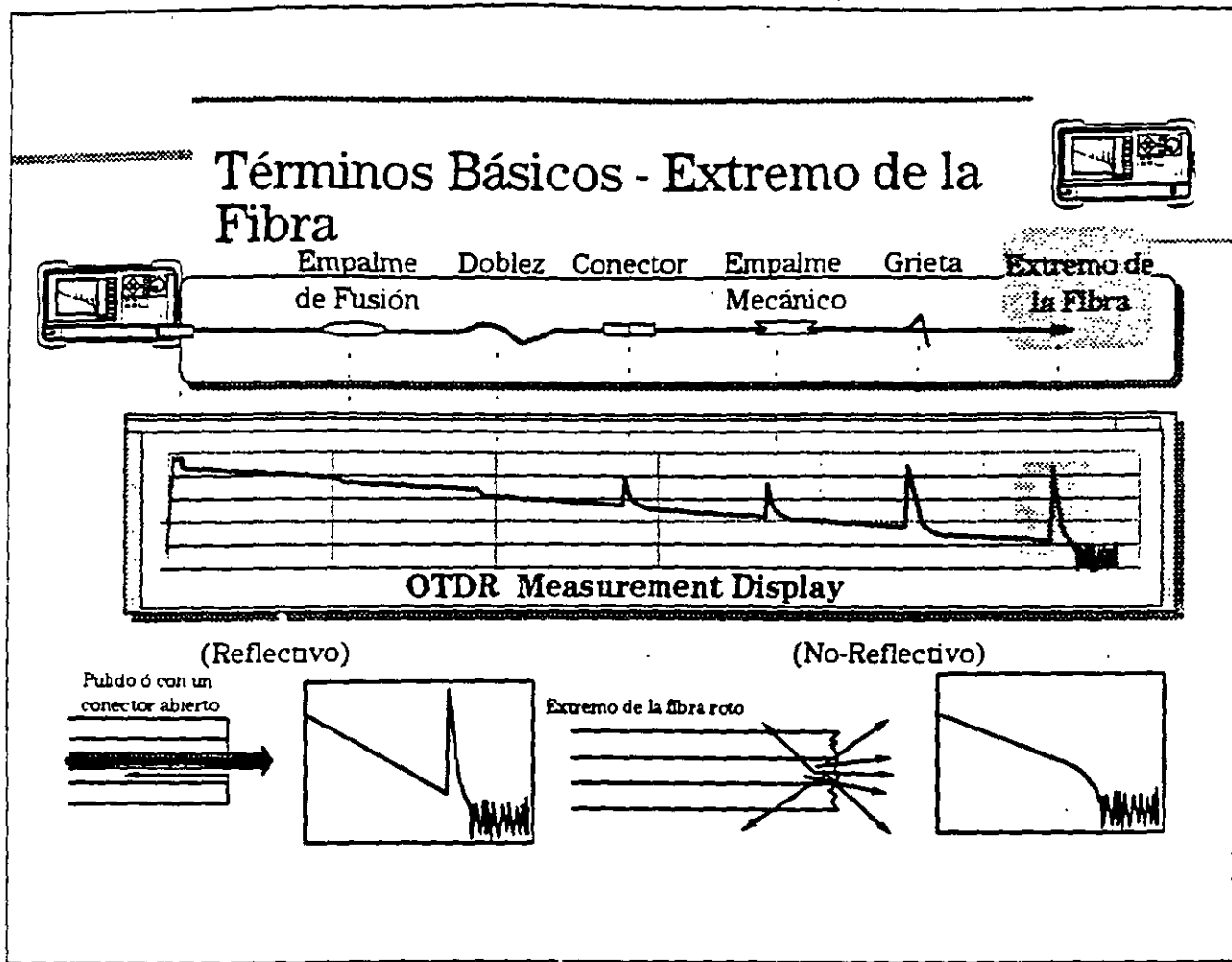


Empalme Mecánico
ó Conector



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

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



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

“Tres décadas de orgullosa excelencia” 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III: TELECOMUNICACIONES VÍA
FIBRAS OPTICAS**

TEMA

RECEPTORES OPTICOS

**EXPOSITOR: M. EN C. ROBERTO LINARES
PALACIO DE MINERIA
JUNIO 2001**

"RECEPTORES OPTICOS"

EN UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS.

RECEPTOR.- EXTRAE LA INFORMACION DESDE LA PORTADORA OPTICA QUE INCIDE EN EL DETECTOR.

SISTEMA DIGITAL.- EL RECEPTOR PRODUCE UNA SECUENCIA DE PULSOS ELECTRICOS (UNOS Y CEROS) QUE SON UNA REPRODUCCION FIEL DE LA INFORMACION DIGITAL QUE EXCITA LA FUENTE DE LUZ DEL TRANSMISOR.

SISTEMA ANALOGICO.- EL RECEPTOR AMPLIFICA LA SALIDA DEL DETECTOR Y DEMODULA LA SEÑAL AMPLIFICADA PARA OBTENER LA INFORMACION.

EN ESTOS SISTEMAS EL "RECEPTOR" ES EL BLOQUE MAS "CRITICO" YA QUE ESTE DETERMINA TODA UNA SERIE DE PARAMETROS DEL SISTEMA TALES COMO:

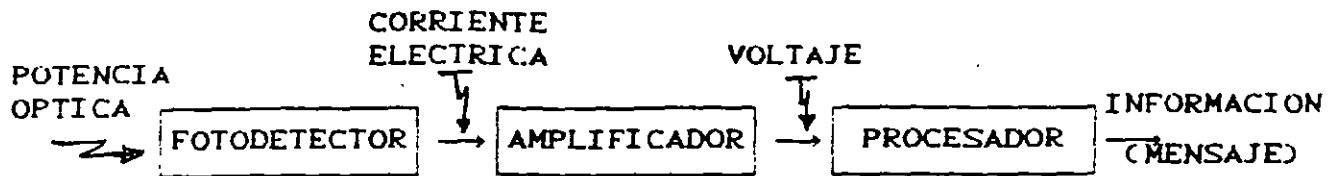
SENSIBILIDAD

INTERVALO DINAMICO

VELOCIDAD DE TRANSMISION

ESTABILIDAD

CONFIABILIDAD



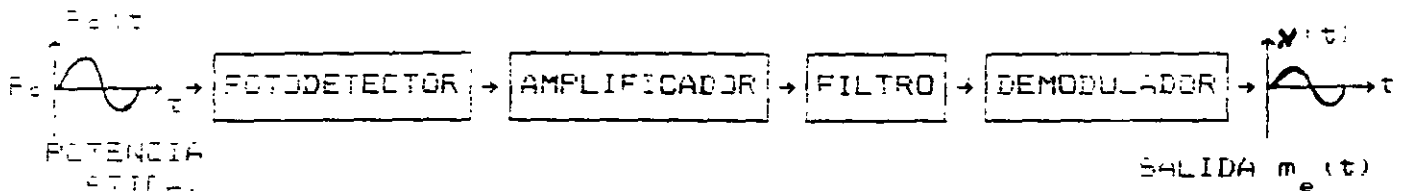
FOTODETECTOR.- CONVIERTE LA POTENCIA OPTICA A POTENCIA ELECTRICA
 LA POTENCIA OPTICA ES UNA CANTIDAD EN BANDA DE BASE
 (LAS VARIACIONES SON DE ACUERDO A LA AMPLITUD Y NO
 CON RESPECTO A LA FASE.

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODETECTOR ES MUY PEQUEÑA (NANOAMPERES).

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

$m(t)$ = M. SEÑAL ANALOGICA (PORTADORES)

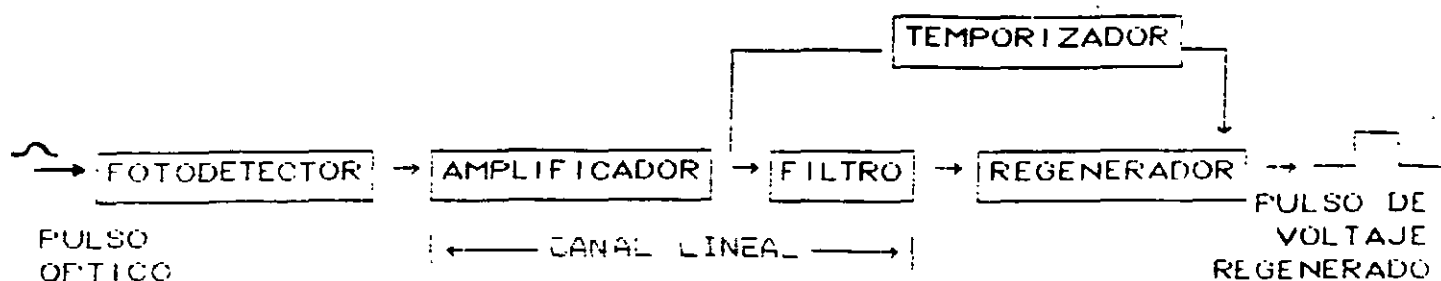
PARA UNA SIMPLE INTENSIDAD DE MODULACION

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

$$\gamma \leq 1$$

$\gamma \leq 1$ - 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

$$P_{OPTICOS}(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p_p(\tau - kT)$$

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 PULSO

LA SEÑAL DE SALIDA DEL FOTODETECTOR ES:

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

R = (A/W) RESPONSIVIDAD

LA SEÑAL DE SALIDA DEL CANAL LINEAL

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

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

EN UN INTERVALO DEL PULSO "T" LA SEÑAL $v_{OUT}(\tau)$ SE COMPARA CON UN UMBRAL PARA DETERMINAR SI HAY PULSO O NO HAY PULSO

TAMBIEN SE PUEDE TENER CON SUBPORTADORA DE FASE.

$$P_{OPTICA}(t) = P_0 \left[1 + \cos[\omega t + \gamma m(t)] \right]$$

ω - FRECUENCIA INTERMEDIA

LA CORRIENTE ELECTRICA QUE PROPORCIONA EL FOTODETECTOR ES

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

$$R = \text{RESPONSIVIDAD} = (A/W)$$

LA CORRIENTE SE AMPLIFICA Y SE FILTRA

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

SI EL SISTEMA ES CON SUBPORTADORA DE FASE - EL DEMODULADOR PUEDE SER REEMPLAZADO POR UN DISCRIMINADOR.

LA LIMITACION ES: LA RELACION SEÑAL A RUIDO
LA NO LINEALIDAD

VENTAJAS: SIMPLICIDAD
CAPACIDAD DE ANCHO DE BANDA

CRITERIO PRACTICO DE LA FIDELIDAD ES EL ERROR CUADRATICO MEDIO

EL VALOR PROMEDIO DEL CUADRADO DE LA DIFERENCIA DE LOS MENSAJES DE SALIDA - ENTRADA

$$MSE = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (e_n)^2$$

TAMBIEN SE DEFINE: COMO UNA ESTADISTICA O PROMEDIO DE DEL CUADRADO DE TODOS LOS POSIBLES MENSAJES Y DEGRADACIONES (RUIDO E INTERFERENCIA).

EL REGENERADOR.- COMPARA Y SE SINCRONIZA POR EL TEMPORIZADOR A LA VELOCIDAD DE LLEGADA DE LOS PULSOS.

IDEALMENTE.- CUANDO HAY PULSO (UNO), $V_{out}(t)$ DEBERA EXCEDER SIEMPRE EL UMBRAL.

LA REALIDAD.- EL RUIDO E INTERFERENCIAS (DE PULSOS ADYACENTES O DE OTROS SISTEMAS) PUEDEN AUMENTAR O DISMINUIR LA SEÑAL IDEAL ($V_{out}(t)$) CAUSANDO ERRORES.

EL CRITERIO DE FIDELIDAD: TASA DE ERROR (BER)

EL VALOR TÍPICO 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 INTERFERENCIA 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:

$$P(\text{error}) = e^{-NAV}$$

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

LA ENERGIA MINIMA DETECTABLE ES:

$$E = 21 \text{ h}\nu$$

LA POTENCIA MINIMA DETECTABLE ES:

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

SE LLAMA LIMITE CUANTICO.

PREAMPLIFICADORES OPTICOS

LA CALIDAD DEL RECEPTOR DETERMINA TODA UNA SERIE DE PARAMETROS IMPORTANTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS.

SENSIBILIDAD
INTERVALO DINAMICO
VELOCIDAD DE TRANSMISION
TASA DE ERROR

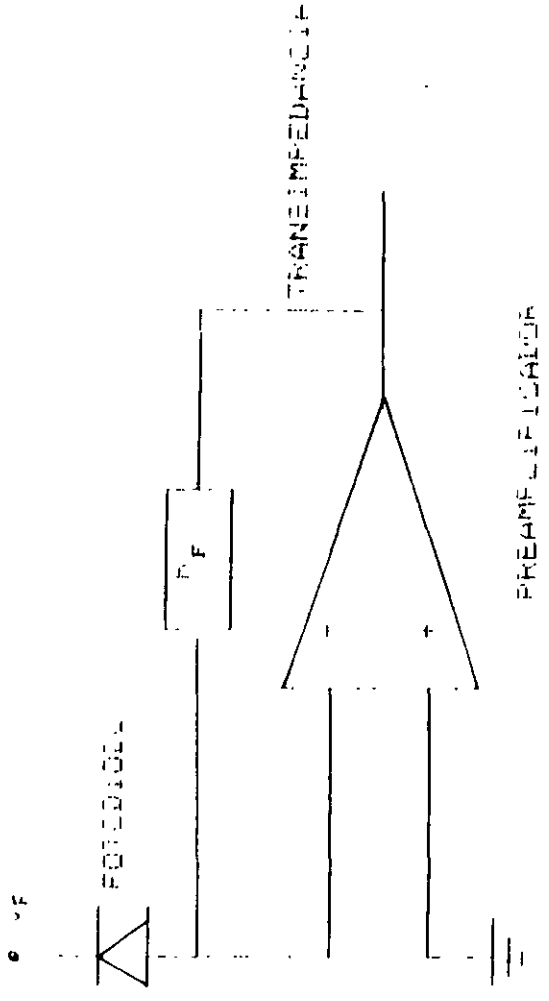
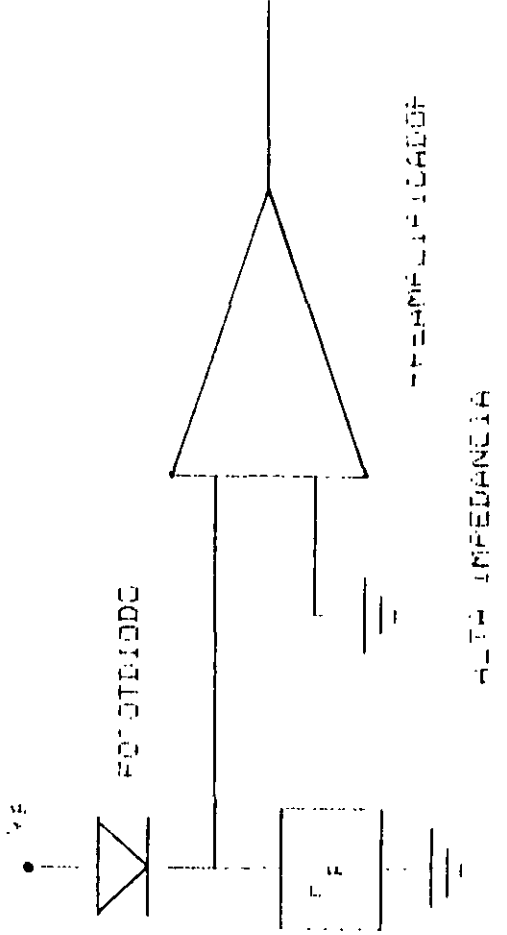
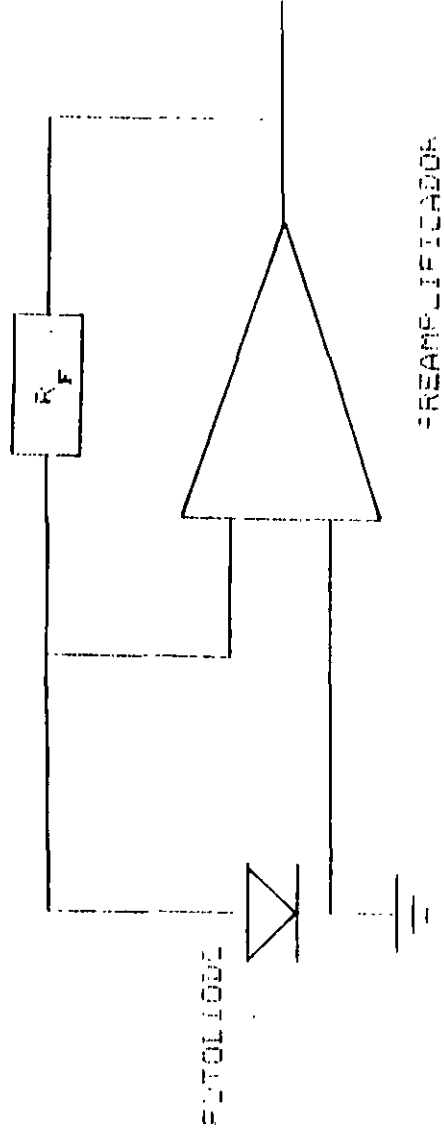
EL PREAMPLIFICADOR ES EL BLOQUE MAS CRITICO DEL RECEPTOR.

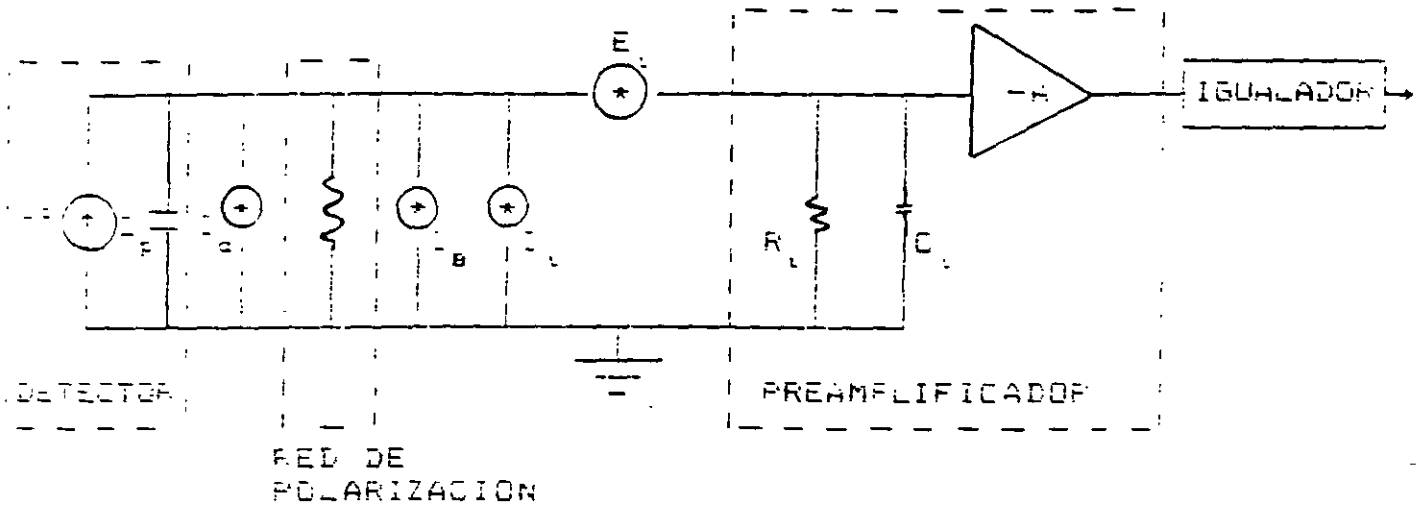
SUS CARACTERISITICAS IMPORTANTES SON:

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

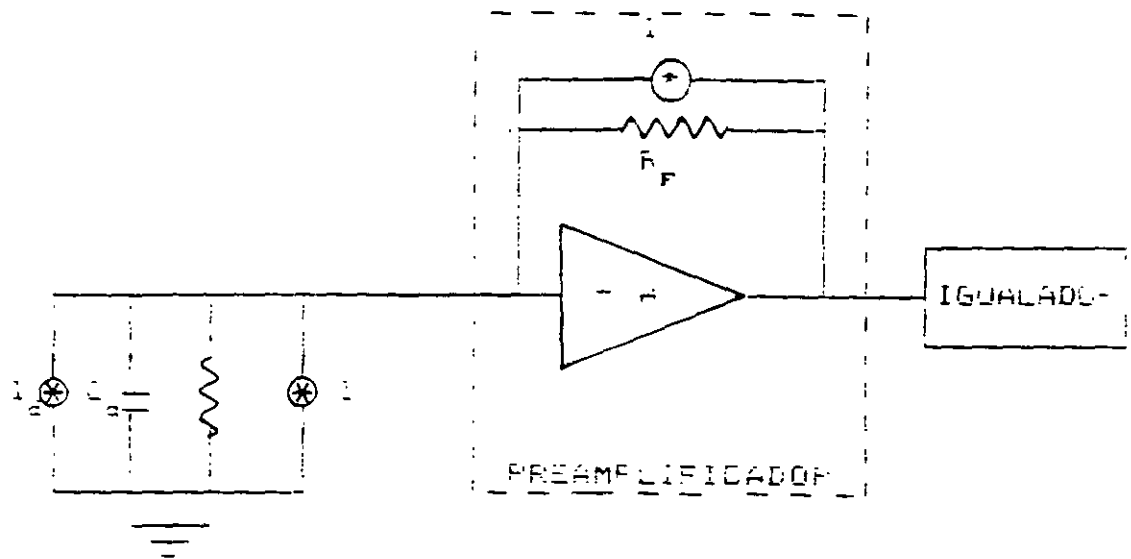
LAS CONFIGURACIONES COMUNMENTE USADAS EN LOS PREEMPLIFICADORES OPTICOS SON:

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

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

DONDE:

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

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

$C_1 =$ Capacitancia de Entrada.

$A =$ ganancia de Transimpedancia.

$B =$ ancho de Banda.

$$f_{in-optima} = \frac{kT}{e \cdot \text{case.}} = \frac{\sqrt{C_1^2}}{2q \frac{1}{C_1} B}$$

$$V_{in-optima} = \frac{4kT \cdot 2q \cdot B \cdot \frac{1}{C_1}}{e \sqrt{C_1^2}}$$

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ COPT. Carga del Electron.

$I_1 =$ corriente de Corriente de I_1

———— SI SE UTILIZA COMO T_1 UN JFET ————

EL RUIDO DE SALIDA DEL PREAMPLIFICADOR ES:

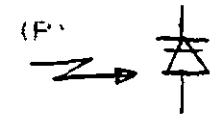
$$V_{out-rms} = \left[V_{out}^2 \right]^{1/2} = \left[1.8 \frac{B^3}{\mu gm} \left(2q \frac{1}{C_1} \right)^2 A^2 \right]^{1/2}$$

donde μgm es la transconductancia del JFET.

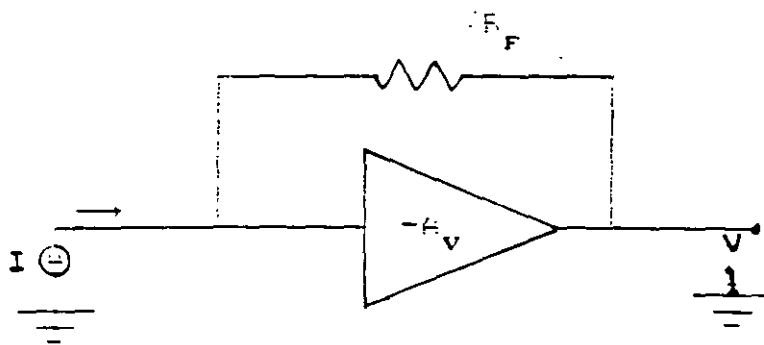
DISEÑO Y SIMULACION DE PREAMPLIFICADORES OPTICOS

EL DETECTOR OPTICO ES UN FOTODIODO

CONVIERTE \rightarrow ENERGIA OPTICA (P^o) \rightarrow CORRIENTE (I)

$I = \eta P^o$


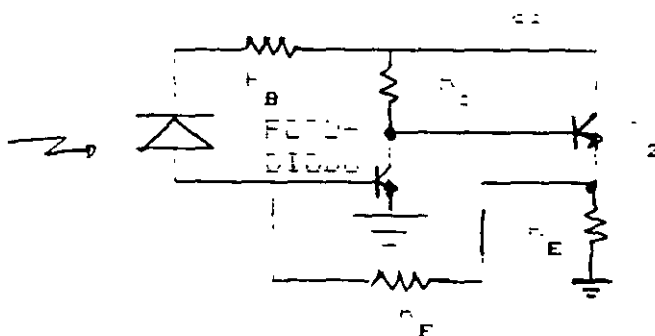
LA CORRIENTE \rightarrow SE PROCESA \rightarrow SE CONVIERTE EN VOLTAJE PARA INTERPRETAR LA ENERGIA OPTICA:



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

$$R_i = \frac{F}{1 - A_v} \quad \text{Donde } A_v = \text{GANANCIA DE VOLTAJE DEL AMPLIFICADOR.}$$

LA CAPACITANCIA DE ENTRADA ES

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

DONDE:

C_D - CAPACITANCIA DEL FOTODIODO.

C_P - CAPACITANCIA PARASITA.

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

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

C_f - CAPACITANCIA DE RETROALIMENTACION.

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

EL ANCHO DE BANDA DEL PREAMPLIFICADOR ESTA LIMITADO POR:

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

$$\text{si } A_v \ll 1 \quad = \quad C_i \approx (C_{bc} + C_f) (1 - A_v)$$

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

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

RUIDO

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

UNIDADES:

k = 1.38×10^{-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.

$$\gamma_{in-optimo} = \frac{kT}{q \cdot I_{base}} = \frac{\sqrt{3\beta_1}}{2\pi C_1 B}$$

$$\gamma_{in-optimo} = \frac{kT (2\pi C_1 B)^2}{q \sqrt{3\beta_1}}$$

q = 1.6×10^{-19} C. Carga del Electron.

I_1 = Corriente de Colector de T_1 .

————— SI SE UTILIZA COMO T_1 UN JFET —————

EL RUIDO DE SALIDA DEL PREAMPLIFICADOR ES:

$$V_{OUT}^2 = \left[V_{OUT}^2 \right]^2 = \left[1.3 \frac{I_1}{\mu A} \left(2\pi C_1 \right)^2 B^2 \right]^2$$

donde g_m 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.

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	

NEC

Optical Fiber Transmission Mode		Multi-MoCo				
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%)			
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				
Line	Allowable Link Loss	40.5dB	35.5dB	33.5dB	28.5dB	
	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		

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 μ m, (L) shows 1.3 μ m

NEC

EL RECEPTOR PRESENTA CARACTERISTICAS SIMILARES A LOS RECEPTORES DE LOS SISTEMAS COMERCIALES :

TNO 432

140 Mbit/s MULTIPURPOSE optical line terminal

TECHNICAL DATA

Line Terminal

Function (cross connect) CMI
 Code: 139, 264 Mbit/s = 15 ppm
 Loss: 12 dB max at 69, 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*	-36 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.

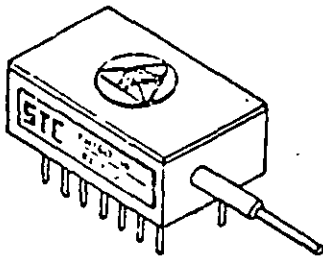
OPTICAL CHARACTERISTICS

Transmission medium: Monomode fibre or multimode graded index fibre
 Source: Laser diode
 Wavelength: 1.3 μ m
 Spectral width: 3 nm
 Detector: PIN-FET
 AGC dynamic range: 20 dB

Fibre Optic Receiver

PH series

Wavelength 1000nm to 1600nm.



FEATURES

- * InGaAs Photodetector PIN diode & GaAs FET preamplifier.
- * HIGH IMPEDANCE INTEGRATING design for very high sensitivity.
- * Suitable for bounded data at rates from 2.0 to 320 Mbaud.
- * Novel stabilizing network ensures suppression of oscillation.
- * Epoxy-free, hermetic metal package.
- * 50/125 μm 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)

SE HAN REPORTADO RESULTADOS SIMILARES CON PREAMPLIFICADORES DE GaAsFET.

SE CONCLUYE LAS TECNICAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCION SEGUIDAS ES UNA BUENA OPCION PARA CONSTRUIR PREAMPLIFICADORES OPTICOS DE ALTA VELOCIDAD, ALTA FUNCIONALIDAD Y BAJO COSTO.

CON RESPECTO AL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

LA ETAPA AMPLIFICACION DE RF.

TIENE UNA CARACTERISTICA AMPLITUD-FRECUENCIA PLANA EN EL INTERVALO DE FRECUENCIA DE INTERES, SU ANCHO DE BANDA ES 210 MHz, LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS TEORICOS SON MUY CERCANOS.

EL DETECTOR PICO-PICO CON UMBRAL DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA ES UN CIRCUITO BASTANTE VERSATIL PUEDE APLICARSE EN UNA GRAN VARIEDAD DE SISTEMAS RADIOELECTRICOS.

LA EFICIENCIA DEL DETECTOR PICO-PICO ES DE 0.9

SU UMBRAL SE FIJA PARA EL NIVEL DE AMPLITUD A PARTIR DEL CUAL EL CONTROL SE REALIZA.

LA ESTIMACION DEL COMPORTAMIENTO DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA SE REALIZO EN TODO EL INTERVALO DINAMICO DE LA POTENCIA OPTICA LA DISCREPANCIA CON RESPECTO A LO PREDICHO ES DEL 8%.

EL FILTRO PASA BAJOS REQUIERE COMPONENTES DE PRECISION DE 1% O MENOR PARA QUE EL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL SEA APROXIMADAMENTE IGUAL AL TEORICO. CON RESPECTO A LA FRECUENCIA DE CORTE SE OBTUVO UNA EXACTITUD DEL 8%.

EL CIRCUITO DE PROTECCION DEL APD SE LIMITA A UN VALOR MAXIMO DE 40.1 VOLTS DE CORRIENTE DIRECTA Y A UN VALOR MINIMO DE 10 VOLTS DE CORRIENTE DIRECTA.

LA POLARIZACION DEL APD SE FIJO A LA GANANCIA OPTIMA (38.6 VOLTS)

EL ANCHO DE BANDA DEL RECEPTOR ES 140 KHz A 126 MHz

EL INTERVALO DINAMICO DE POTENCIA OPTICA DEL RECEPTOR ES DE
-45 dBm A -20 dBm

EL INTERVALO DINAMICO DEL FOTODETECTOR ES DE 6 dB

EL INTERVALO DINAMICO DEL AMPLIFICADOR CON CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA ES DE 19 dB.

ESTE RECEPTOR FUNCIONA EFICIENTEMENTE EN JERARQUIAS MENORES PARA LAS QUE FUE DISEÑADO

CON ESTE TRABAJO SE HA OBTENIDO LA EXPERIENCIA EN EL DESARROLLO DE LA ELECTRONICA DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR CABLES DE FIBRAS OPTICAS DE MEDIANA Y ALTA VELOCIDAD, ESPECIALMENTE EN LA CONSTRUCCION DE MONTAJE SUPERFICIAL.

CREEMOS QUE EL PRESENTE TRABAJO REPRESENTA UN PASO IMPORTANTE EN EL DESARROLLO DE NUESTRO PAIS EN EL CAMPO DE LA ELECTRONICA DE ALTA VELOCIDAD Y DE LAS COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS Y COMO CONSECUENCIA ES UN IMPULSO A LA FORMACION DE RECURSOS HUMANOS.

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 mV_{p-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 E. 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:

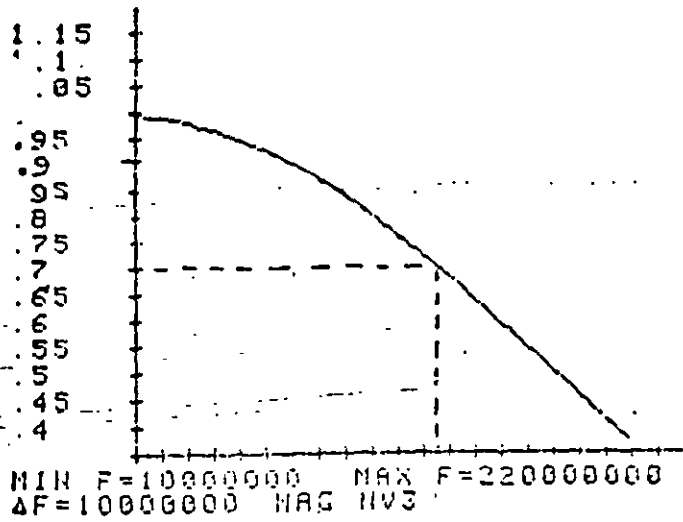
--ENTRE LO CALCULADO CON LA ECUACION PROPUESTA Y LO EXPERIMENTAL ES 2 %

--ENTRE LO SIMULADO Y LO EXPERIMENTAL ES 6.9 %

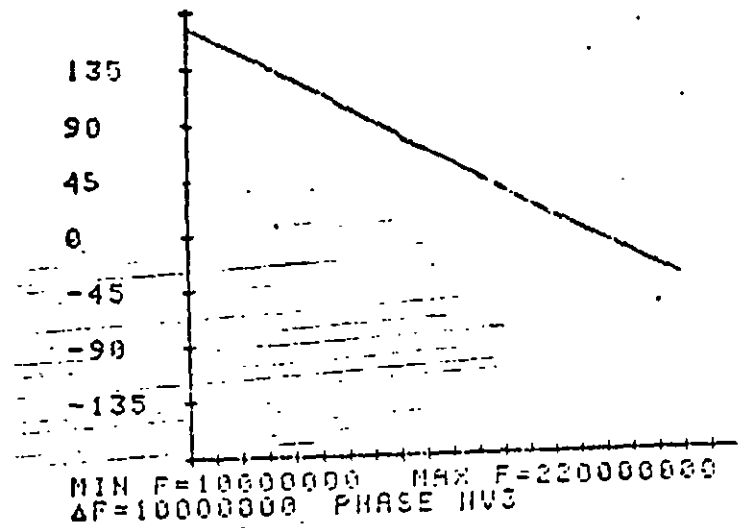
PARA LA TRANSIMPEDANCIA SE TIENE UNA DISCREPANCIA DE 6.3 % ENTRE LO TEORICO Y LO EXPERIMENTAL

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.



(a)



(b)

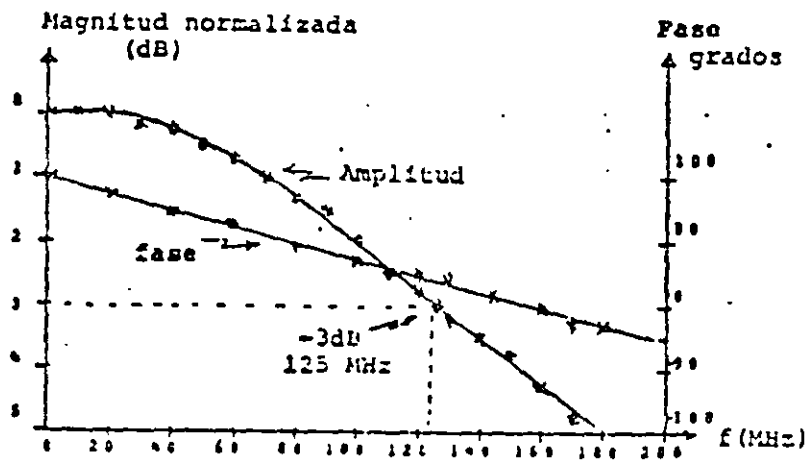


Fig.4.21.-Características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de amplificación de RF en cascada con el filtro Thomson

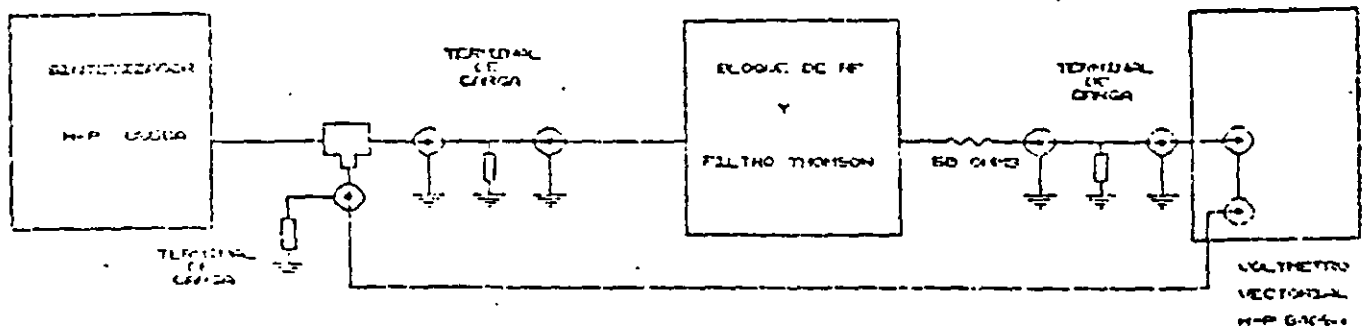


Fig.4.22.-Sistema de medición de las características amplitud-frecuencia y fase-frecuencia de la etapa de

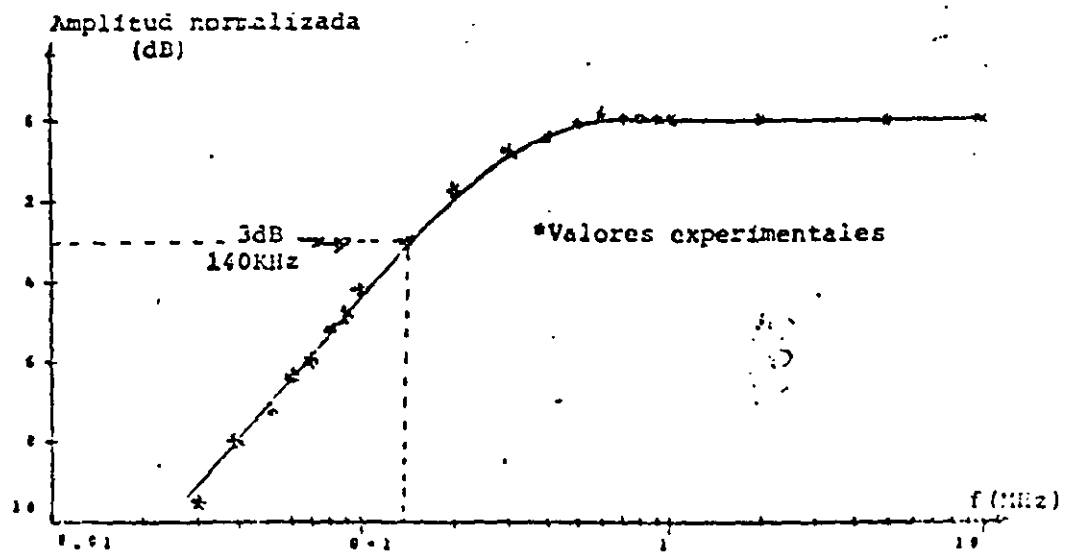
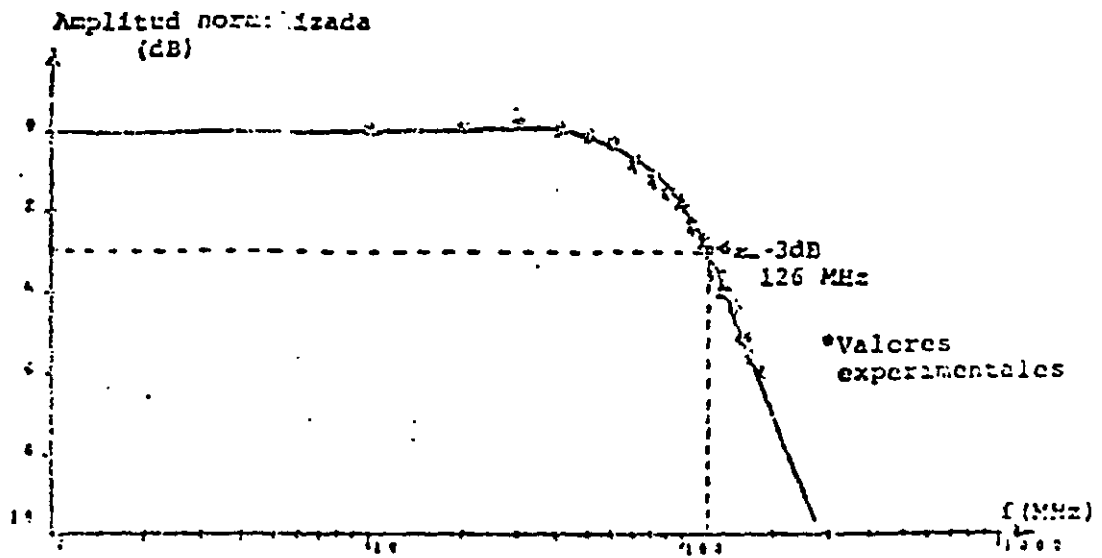


Fig.4.26.-Característica amplitud-frecuencia del receptor óptico para bajas frecuencias.

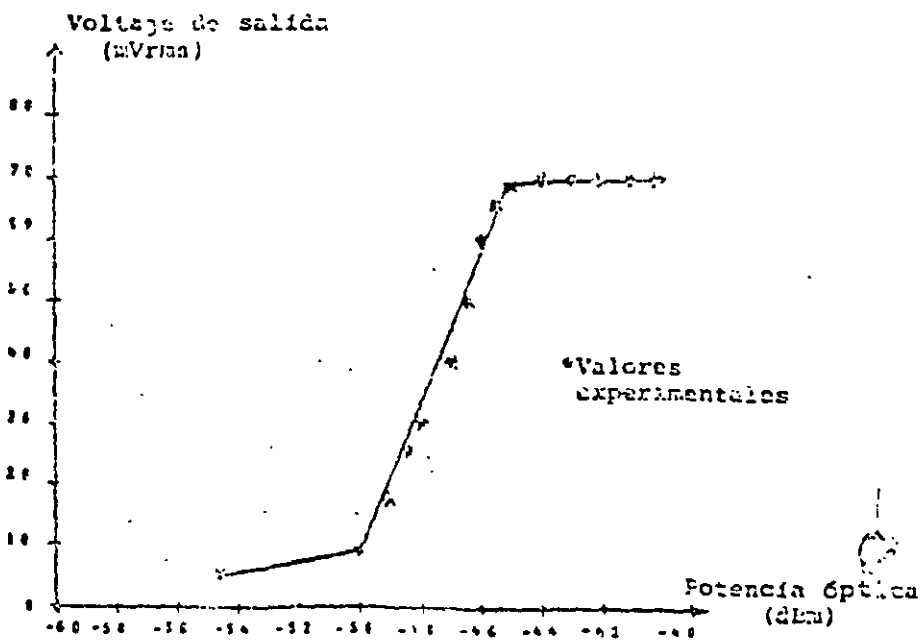


Fig. 4.27.-Característica del voltaje de salida

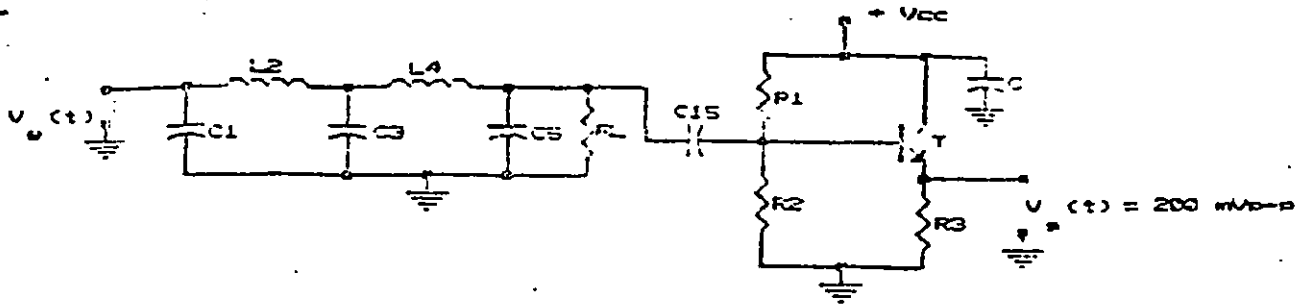


Fig.3.9.-Circuito del filtro Thomson con etapa de desacoplamiento.

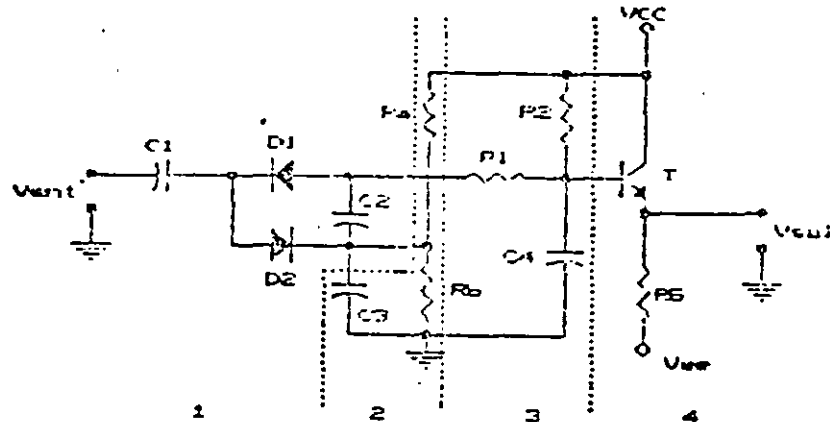


Fig.3.11.-Circuito del detector pico-pico

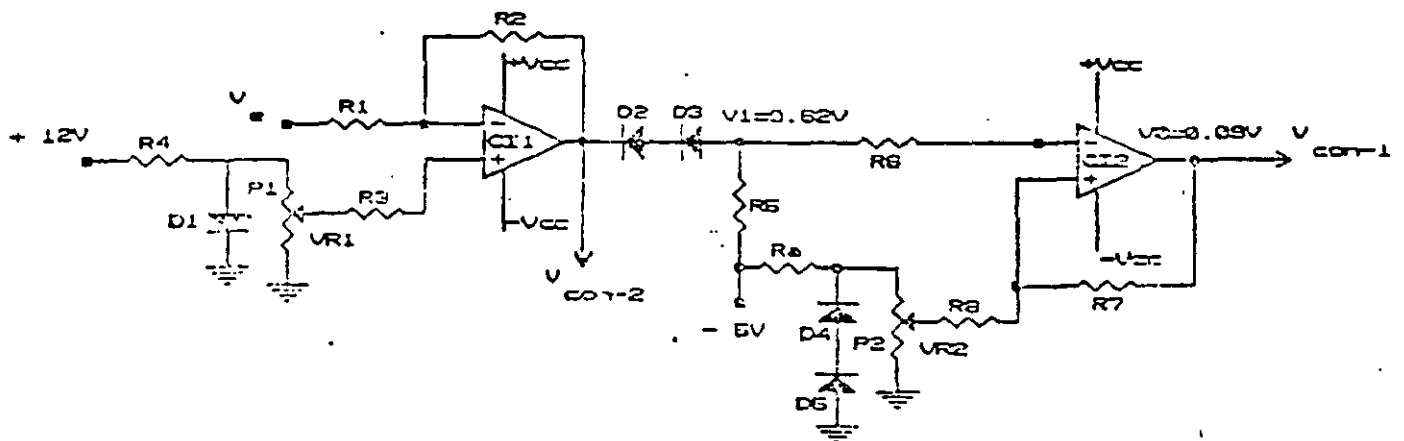
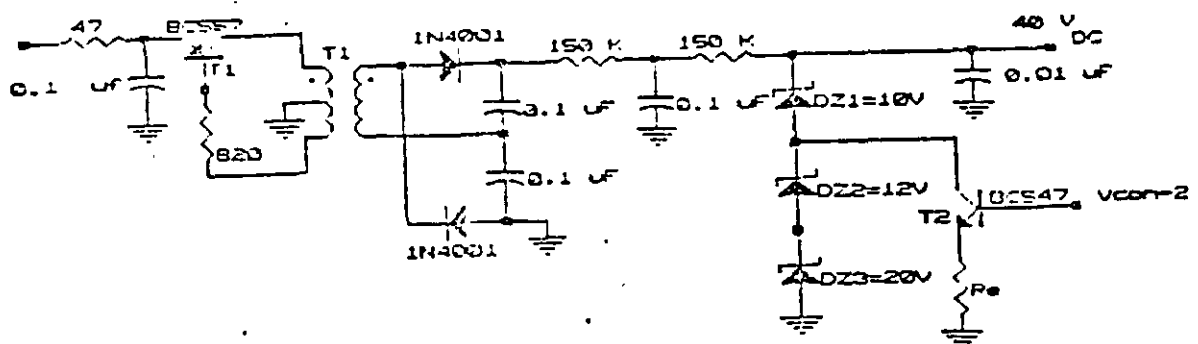


Fig.3.15.-Red de retroalimentación para el control automático de ganancia del receptor óptico



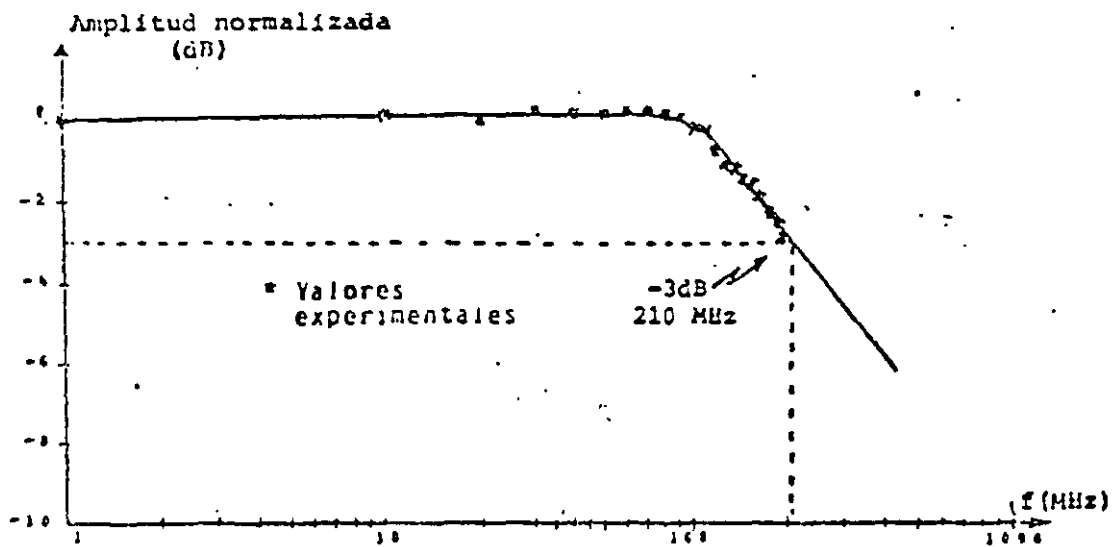
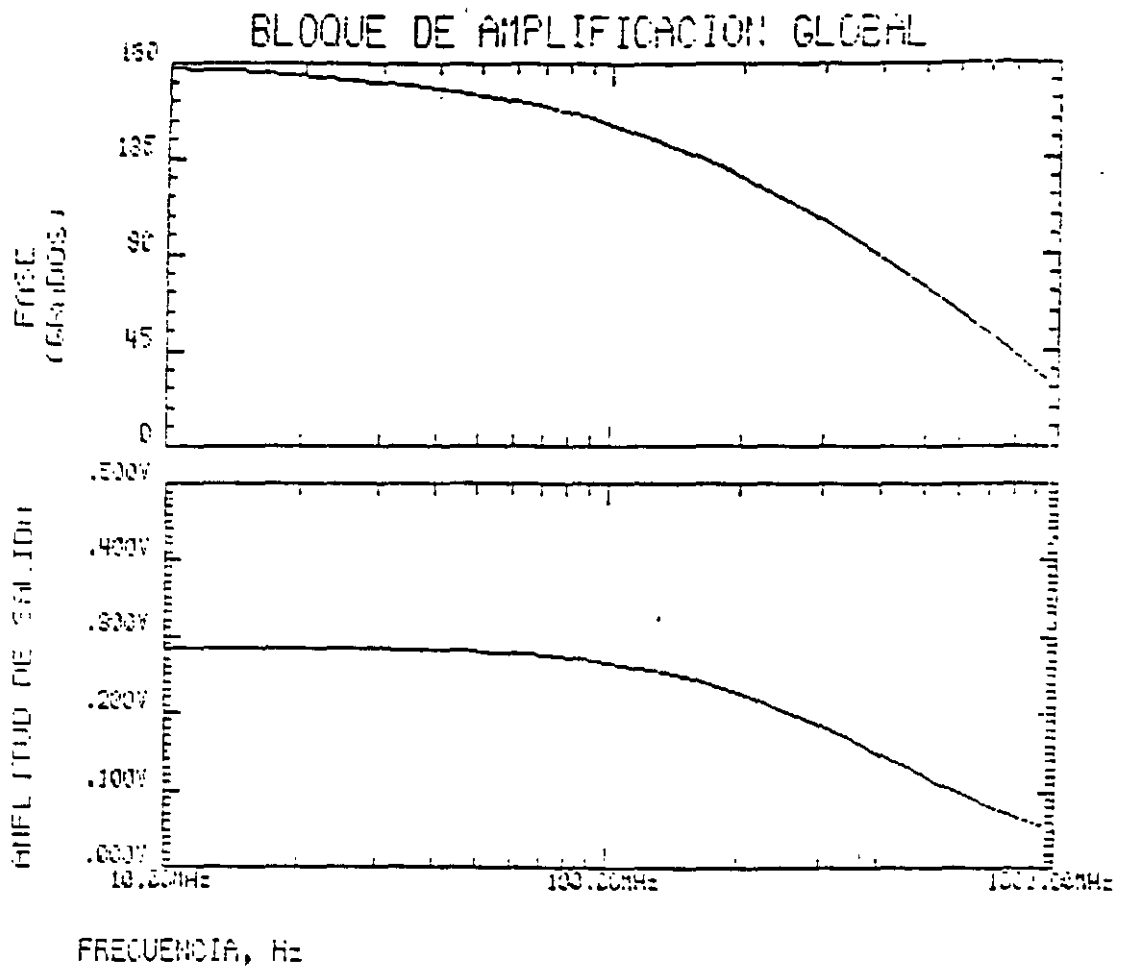


Fig.4.17.-Característica amplitud frecuencia del bloque de RF

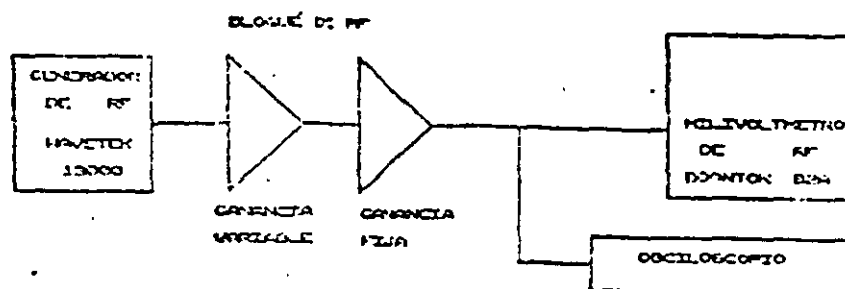
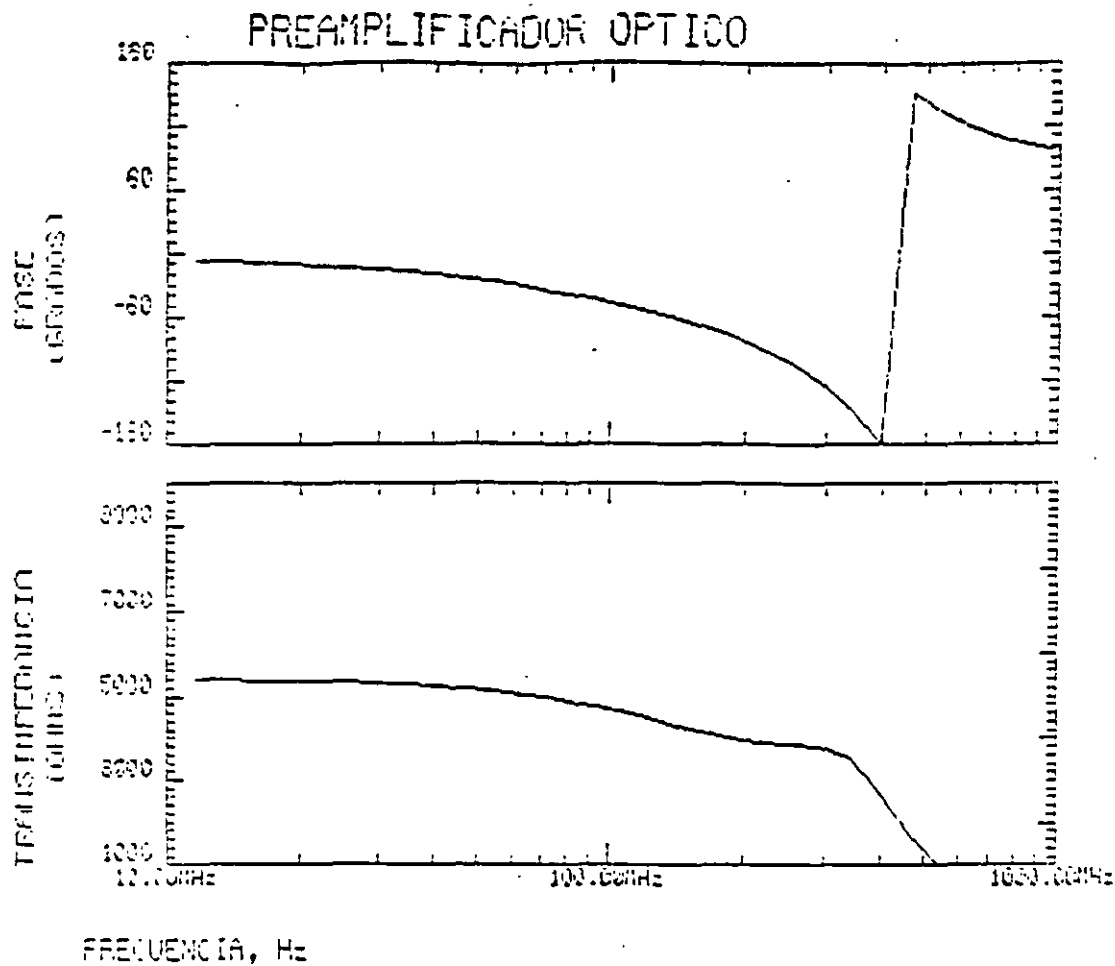


Fig.4.18.-Sistema de medición para la característica de



FRECUENCIA, Hz

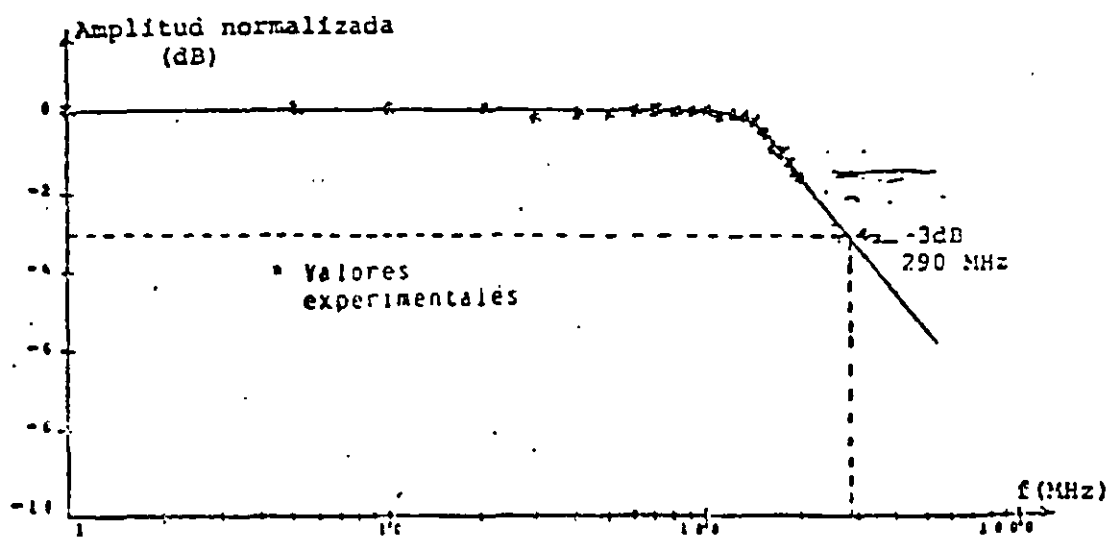
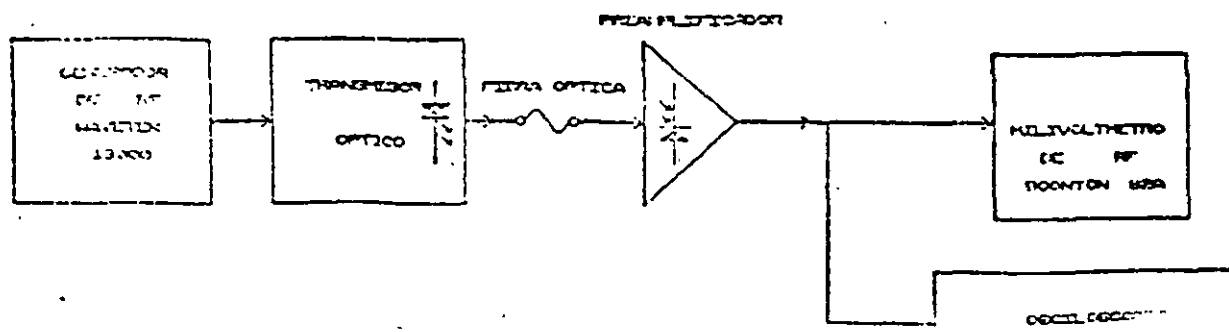


Fig.4.11.-Característica amplitud-frecuencia del preamplificador óptico.



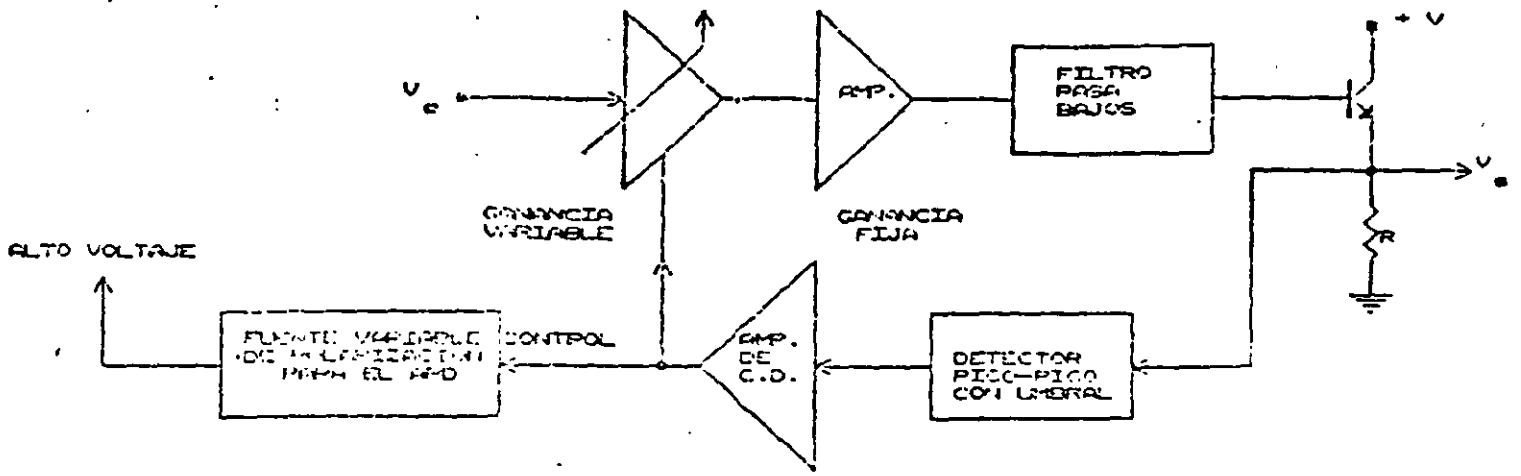


Fig.2.13.-Diagrama a bloques del amplificador con CAG

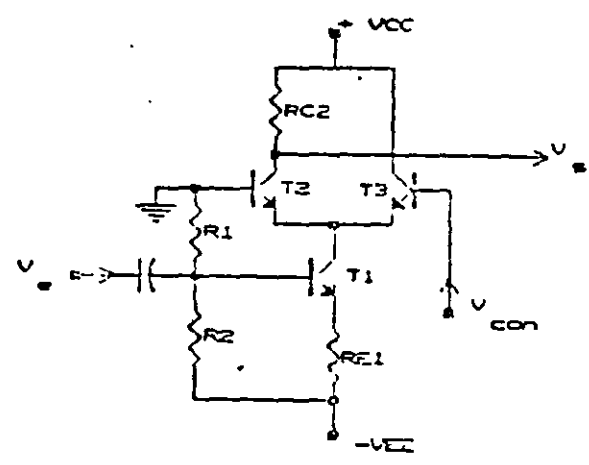


Fig.3.6.-Circuito de la etapa de ganancia variable

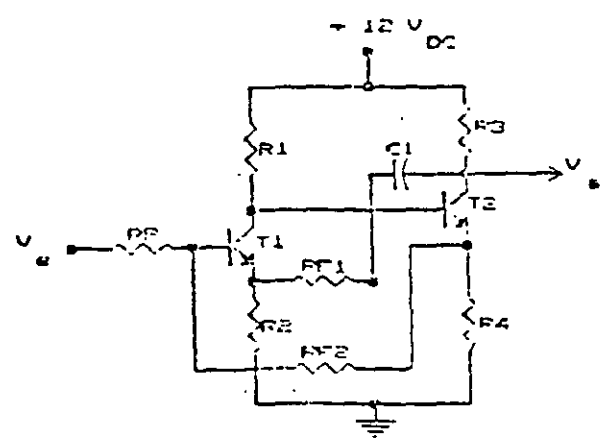


Fig.3.7.-Circuito del amplificador de ganancia constante.

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 SATISFATORIOS.

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

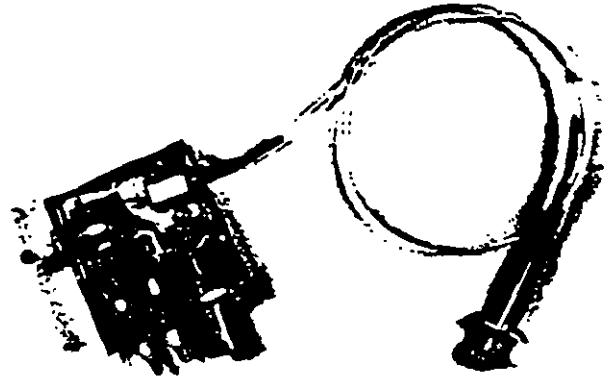
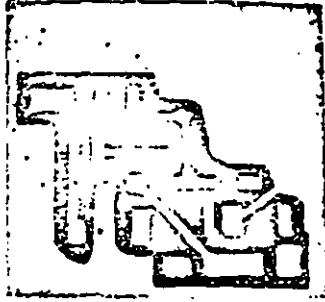


Fig.4.6.-Circuito impreso de los preamplificadores y fotografía de uno de ellos terminado.

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 dejó el espacio suficiente para colocar el preamplificador y la fuente de polarización 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 óptico.

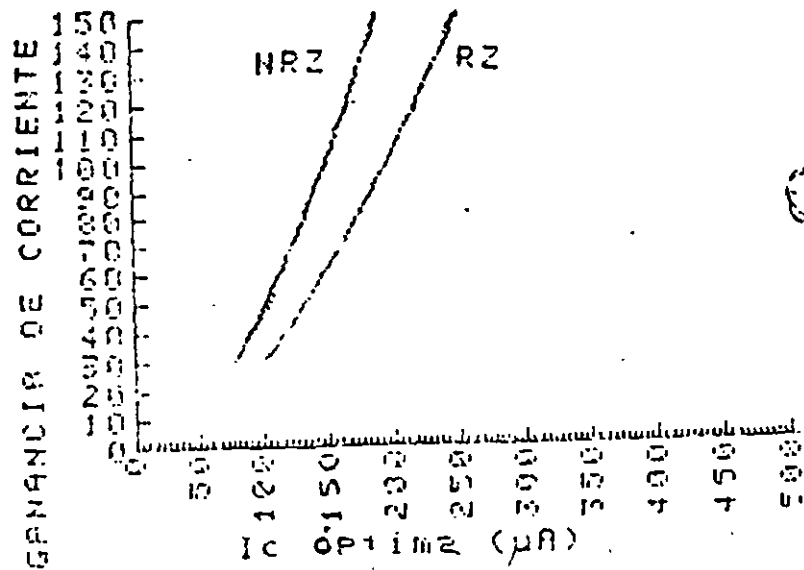


Fig.3.3.-Comportamiento de la corriente de colector óptima para el intervalo de β del transistor MRF931.

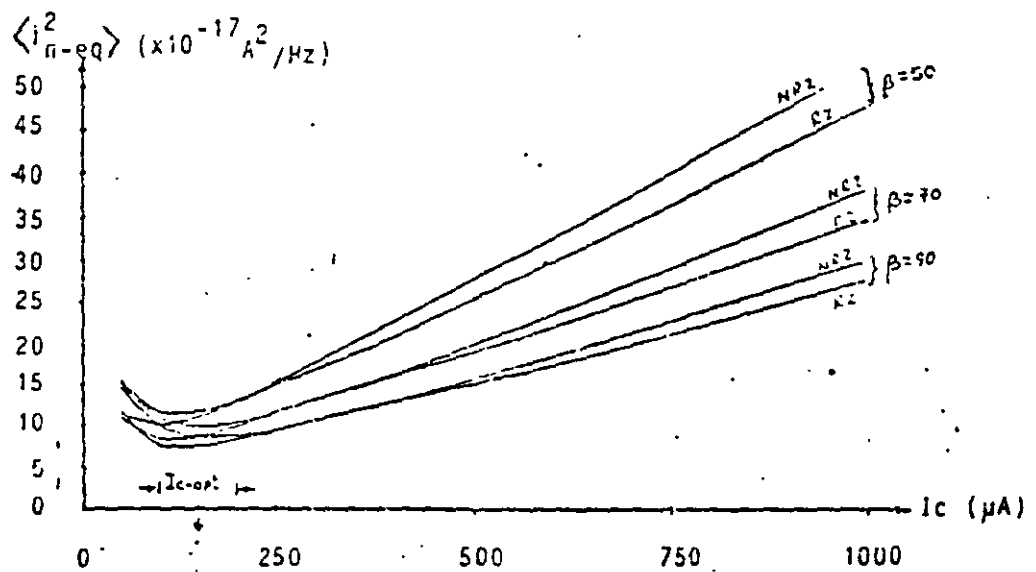


Fig.3.4.-Comportamiento de la corriente de colector de T_1 contra el valor cuadrático medio de la corriente de ruido equivalente de entrada, para diferentes β y los formatos RZ y NRZ

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

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

La potencia promedio mínima detectable se determina por:
para el formato RZ

$$\eta \bar{P} = \frac{h\nu B}{2} \left[3\delta F_d + \frac{12Z}{M} \right] \quad (W) \quad (3.5)$$

para el formato NRZ

$$\eta \bar{P} = h\nu B I_2 \left[3\delta F_d + \frac{12Z}{M} \right] \quad (W) \quad (3.6)$$

donde

$h\nu = 1.529 \times 10^{-19}$, para $\lambda = 1300$ nm

$B = 139.264$ Mbit/s

$I_2 = 0.564$

$F_d = M^x$, M ganancia del APD y $x = 0.95$

$Z =$ figura de merito

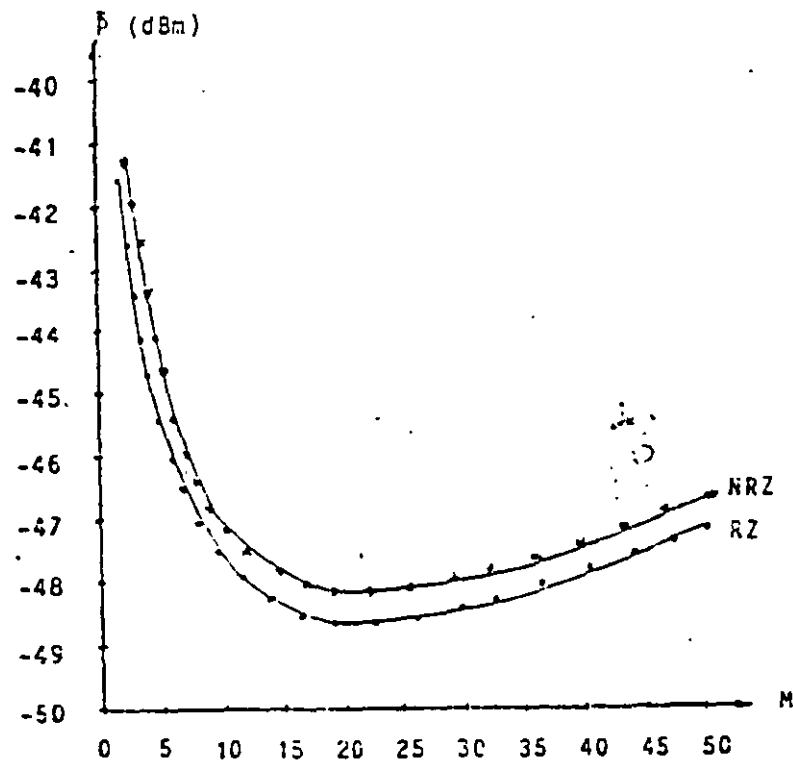


Fig.3.5.-Sensibilidad del preamplificador contra ganancia del APD.

CALCULO DE LA FOTOCORRIENTE DEL FOTODETECTOR DE AVALANCHA

EL FOTODETECTOR UTILIZADO EN EL DISEÑO ES UN APD DE GERMANIO DE FUJITSU TIPO FPD13R12JT SUS CARACTERISTICAS PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE PARA UNA GANANCIA DE DIEZ SON:

- DIAMETRO DEL AREA ACTIVA: $100\mu\text{m}$
- VENTANA DE TRANSMISION (λ): 1300 nm
- EFICIENCIA TIPICA: 70%
- FRECUENCIA DE CORTE TIPICA: 700 MHz PARA $R_L = 50\ \Omega$
- VOLTAJE DE POLARIZACION: $25\text{ V} - 40\text{ V}$
- FACTOR DE RUIDO DE EXCESO: 9
- VALOR DE $X = 0.95$
- CORRIENTE DE OSCURIDAD: $0.33\ \mu\text{A}$

EL CALCULO DE LA FOTOCORRIENTE SE REALIZA UTILIZANDO LA ECUACION (1.3) PARA LA SENSIBILIDAD EXIGIDA.

	MINIMA	MAXIMA	INTERVALO
SENSIBILIDAD (POTENCIA OPTICA PROMEDIO DETECTADA)	-48 dBm	-20 dBm	28 dB
GANANCIA DE CORRIENTE DEL APD	5 (13.79 dB)	30 (29.54 dB)	15.75 dB
FOTOCORRIENTE PROMEDIO	$0.475\ \mu\text{A}$	$52.3\ \mu\text{A}$	

El fotodetector esta acopiado a un tramo de fibra optica, el núcleo de la fibra es de 50 μm y el primer recubrimiento optico 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.

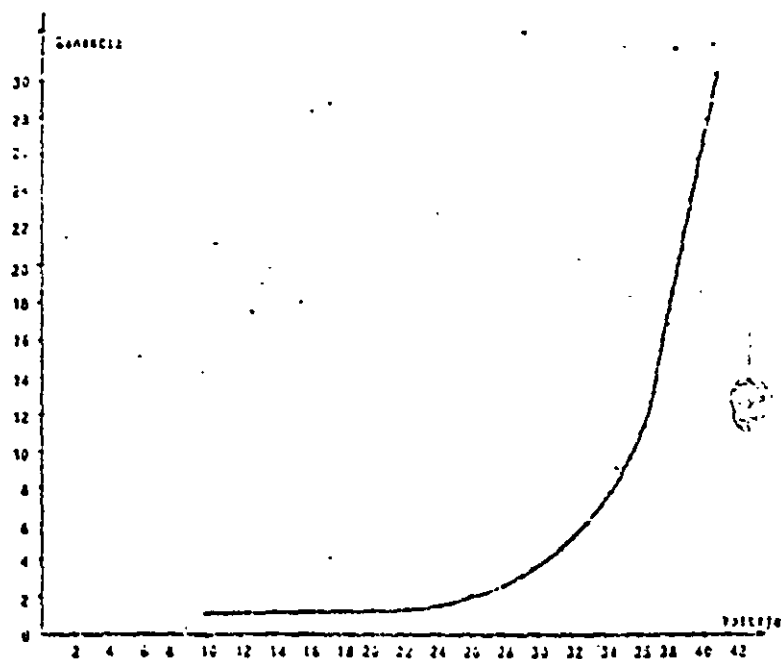
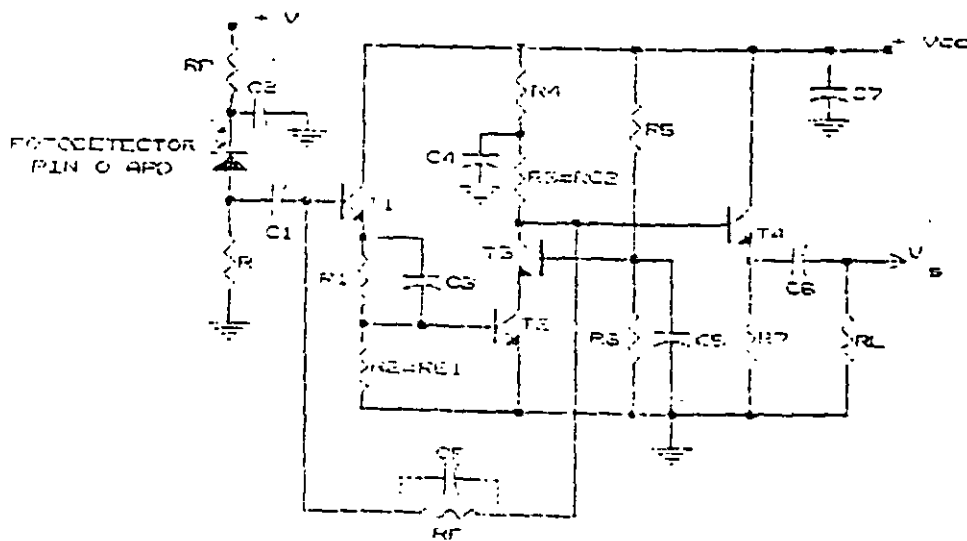


Fig. 3.1.-Característica experimental Ganancia-Voltaje de polarización del APD de fujitsu FD13R12JT.



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

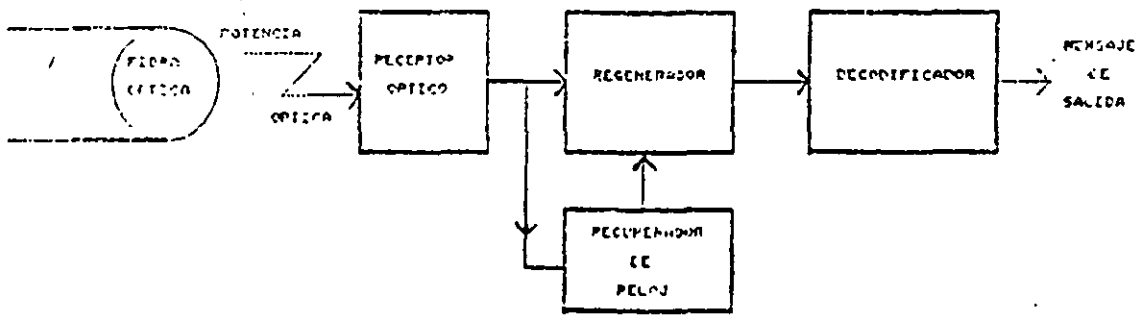
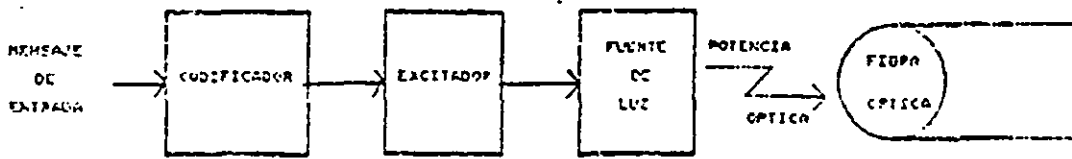
FOTODETECTOR: APD

-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



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.



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

“Tres décadas de orgullosa excelencia” 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

**DIPLOMADO INTERNACIONAL EN
TELECOMUNICACIONES**

**MODULO III: TELECOMUNICACIONES VÍA
FIBRAS OPTICAS**

TEMA

**CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN, ENLACE Y
SISTEMAS DE FIBRAS ÓPTICAS**

**EXPOSITOR: ING. DANIEL PINEDA C.
PALACIO DE MINERIA
JUNIO 2001**

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 mas sencilla pero muy burda consiste en considerar solo la velocidad de los modos mas rápido y mas lento de acuerdo a su trayectoria de rayo.

Esta diferencia es entonces, para una fibra de índice escalonado:

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

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

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:

$$z(\theta_0) = \left(1 + \frac{\mu^4 \theta_0}{4 \cos^2 \theta_0}\right) z(0) \quad (2.3.5.)$$

y con:

$$\Delta z = z(\theta_0) - z(0) = \frac{\mu^4 \theta_0}{4 \cos^2 \theta_0} \frac{nL}{c} \approx \frac{L}{c} \frac{\mu^4 \theta_0}{4 n^3} \quad (2.3.6.)$$

Tenemos:

$$\Delta z_{\text{máx}} = \frac{\mu^4 \theta_0}{4 n^3} \frac{L}{c} = \frac{n_0 \Delta^2 L}{c} \quad (2.3.7.)$$

La figura (2.3.1.), ilustra este efecto.

Sin embargo la aproximación presentada no es suficiente, el análisis de óptica geométrica desarrollado para fibras cuyo perfil de índice de refracción sigue la ley: —

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

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

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

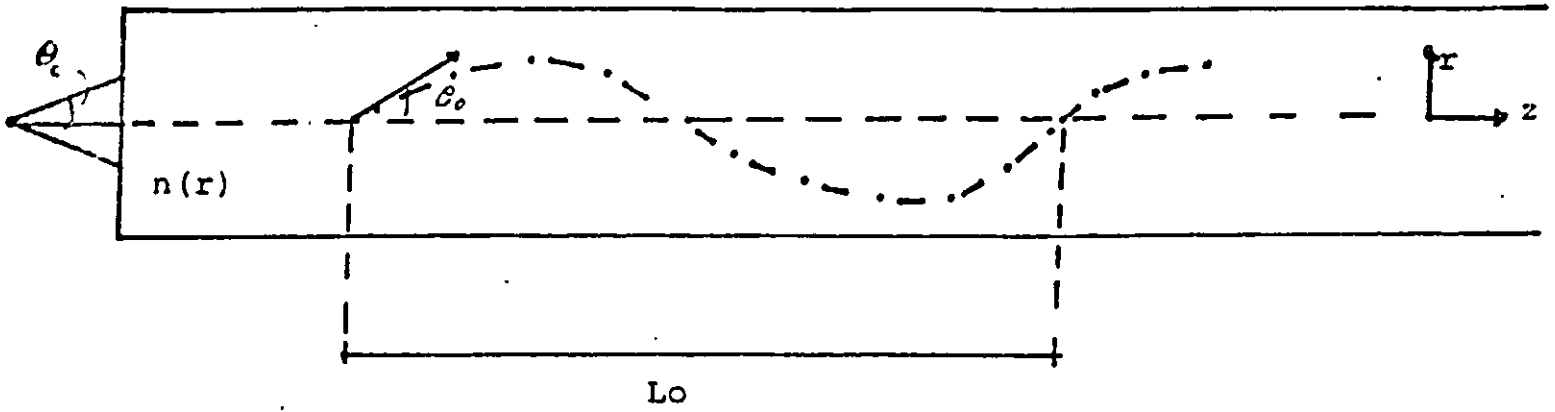
muestra el siguiente resultado para la dispersión modal

$$\tau(\mu) = \frac{Lm_1}{c} \left[1 + \Delta \left(\frac{\alpha - 2 - \epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{\mu}{M}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha+2}} + \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{3\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{\mu}{M}\right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}} \right] \quad (2.3.9.)$$

$$+ \frac{\Delta^3}{2} \left(\frac{5\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2}\right) \left(\frac{\mu}{M}\right)^{\frac{3\alpha}{\alpha+2}} \Big] + O(\Delta^4)$$

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:

$$z = \frac{2a n_1}{c \sin \theta} \quad (2.3.14.)$$

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:

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

El término dominante en los lasers y LEDs típicos ($\lambda - \lambda_0 = 2,30$ nm.) será el de la primera derivación. Ahora si notamos la fórmula (2.3.16.) el factor que determina la dispersión es:

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

La gráfica de la figura (2.3.5.) muestra los valores de M_1 para 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 indico antes M_1 decrese, hasta pasar por cero en $\lambda = 1.27 \mu\text{m}$. implicando una disminución significativa de la dispersión en esta zona, donde otros miembros de la expansión (2.3.17.) son significativos.

La longitud de onda de dispersión material cero depende desde luego de la composición del vidrio, en el caso de $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ varía entre $1.27 \mu\text{m}$. y $1.39 \mu\text{m}$.

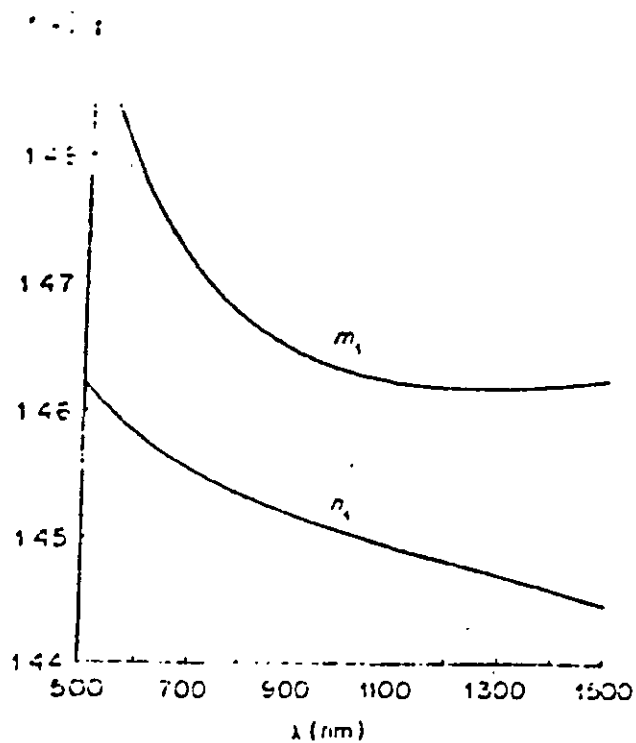


Figura (2.3.4).- Variación de n_1 y m_1 en las longitudes de onda de interés.

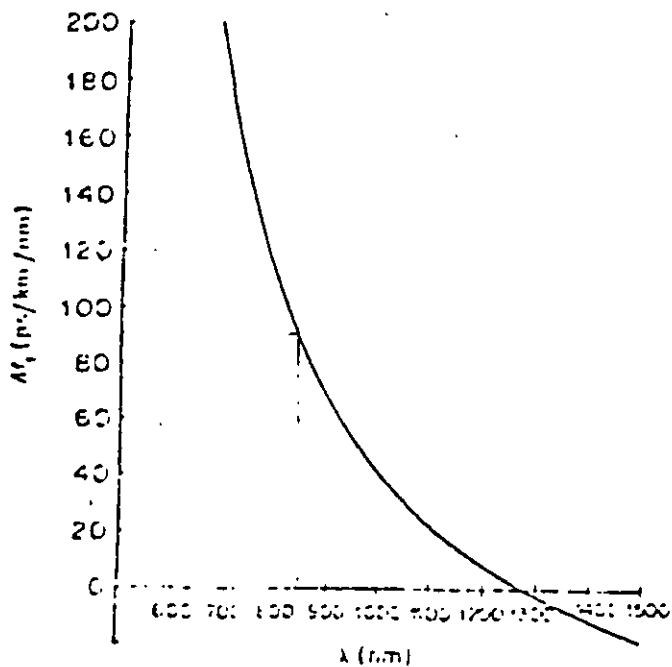


Figura (2.3.5).- Variación de M_1 en función de la longitud de onda.

Dispersión de Guía de Onda.

Aun considerando que el índice de refracción permaneciera constante y un solo modo se transmitiese aparecería un efecto de dispersión cromático si la fuente tuviera un ancho espectral determinado. Considerese la fórmula siguiente:

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

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.

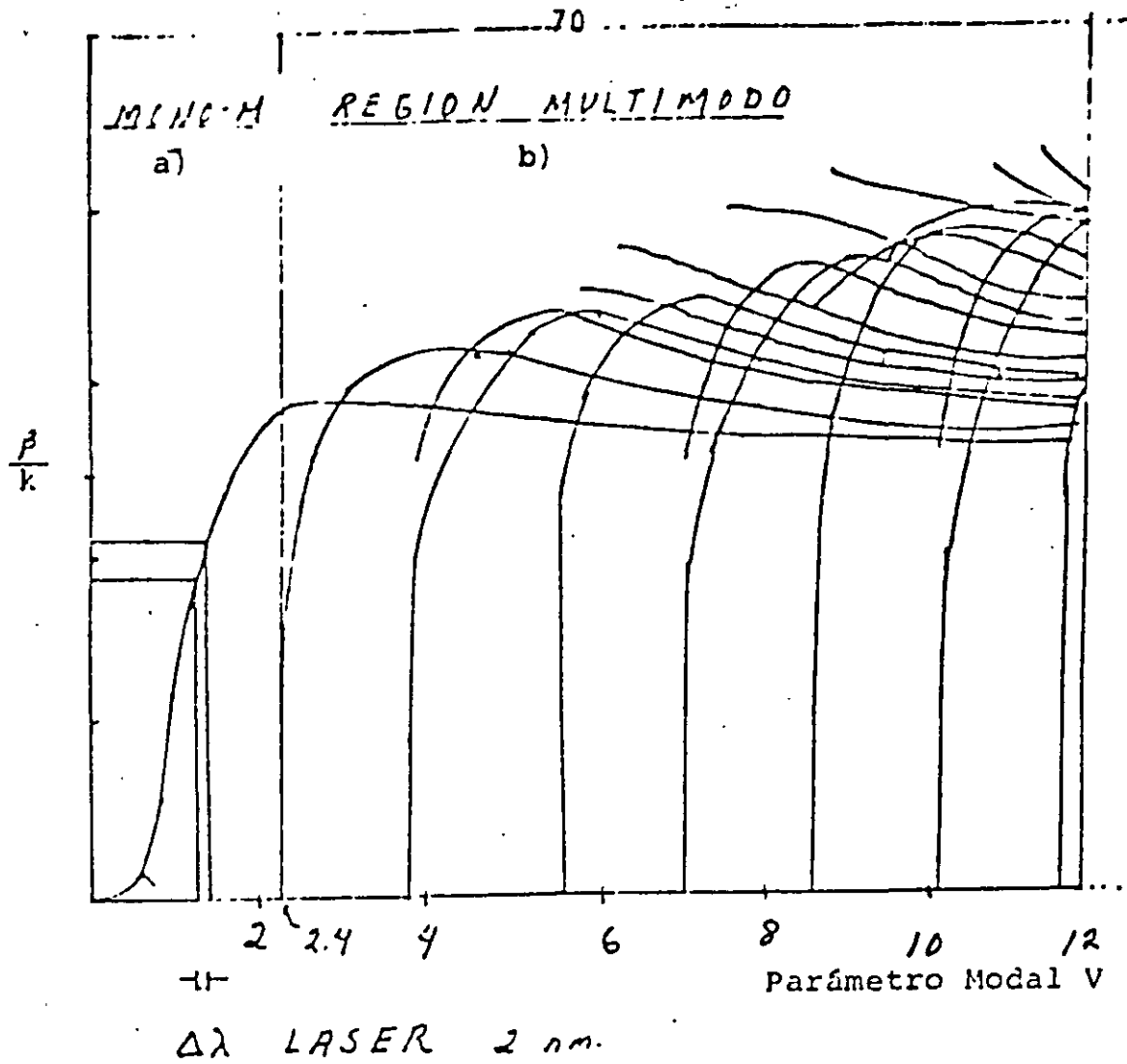


Figura (2.3.6).- Regiones de propagación. a) Monomodal y b) Multimodal.

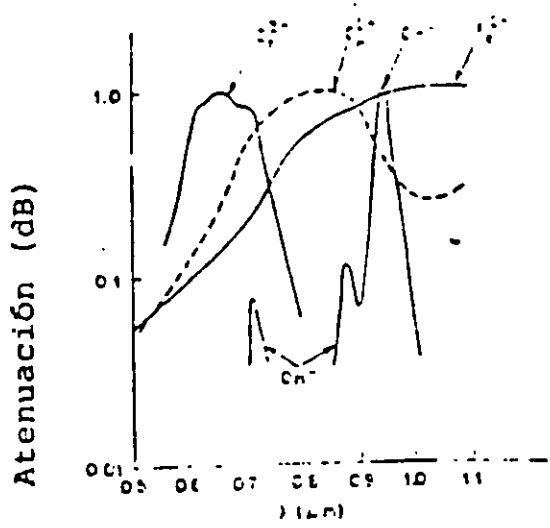


Figura (2.3.7).- Bandas de absorción de diferentes impurezas.

- 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.

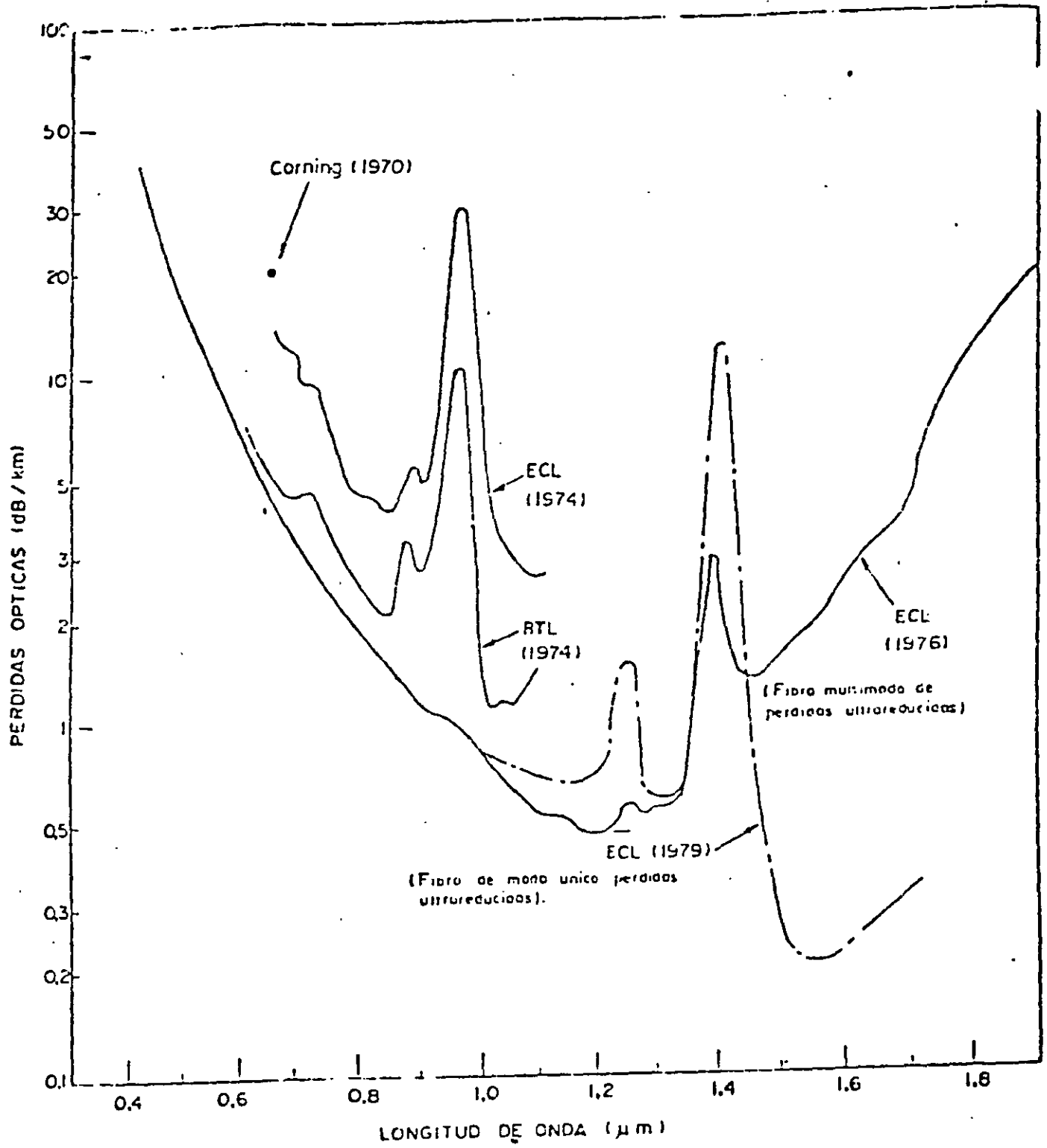
La absorción por impurezas se debe básicamente de la presencia de iones metálicos tales como hierro, cobalto y cromo. La absorción de estos iones varía de vidrio a vidrio dependiendo del estado de Valencia del ion. Introduciendo cantidades fijas de la impureza en un tipo de vidrio dado y calculando las 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.

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

Donde: K = es la constante de Boltzman

T = es la temperatura

y B = la compresibilidad

Para la dispersión por fluctuación de densidad

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

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

y δV = el volumen en que ocurre.

Lo importante es la dependencia en el factor $1/\lambda^4$ de ambos. Siendo la segunda ampliamente dominante con respecto a la primera, se miden sus efectos conjuntos analizando la cantidad de potencia óptica que sale de una fibra y marca un límite absoluto para la reducción en pérdidas.

La tercera causa de dispersión se debe a los efectos de la variación del índice de refracción radial de su valor teórico a lo largo de la longitud de la fibra. Su efecto en fibras de índice

gradual no puede ser estimado directamente ya que estas imperfecciones se confunden con las otras inhomogeneidades en el material. Para la fibra de índice escalonado estas variaciones se presentan como rugosidad en la frontera núcleo/cubierta a lo largo de la longitud y afectan de la misma manera que las microcurvaturas. En fibras monomodo donde estas irregularidades solo son críticas cuando tienen una longitud de onda espacial relacionada con la diferencia entre constantes de propagación del modo fundamental y el que le sigue, se puede detectar su efecto. Para fibras monomodo fabricadas con el método de disposición externa se ha logrado fibras con muy poca contribución de estos efectos y las pérdidas se aproximan mucho al límite fundamental dado por la absorción interna y la dispersión Rayleigh. La figura (2.3.8) muestra el espectro de pérdidas para la fibra monomodal mencionada y la figura (2.3.9) una descomposición de las pérdidas para una fibra de este tipo en sus elementos constituyentes.

El límite teórico como se ve, aproxima 0.16 dB/Km para la región $\lambda = 1.55\mu\text{m}$.

Dadas 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

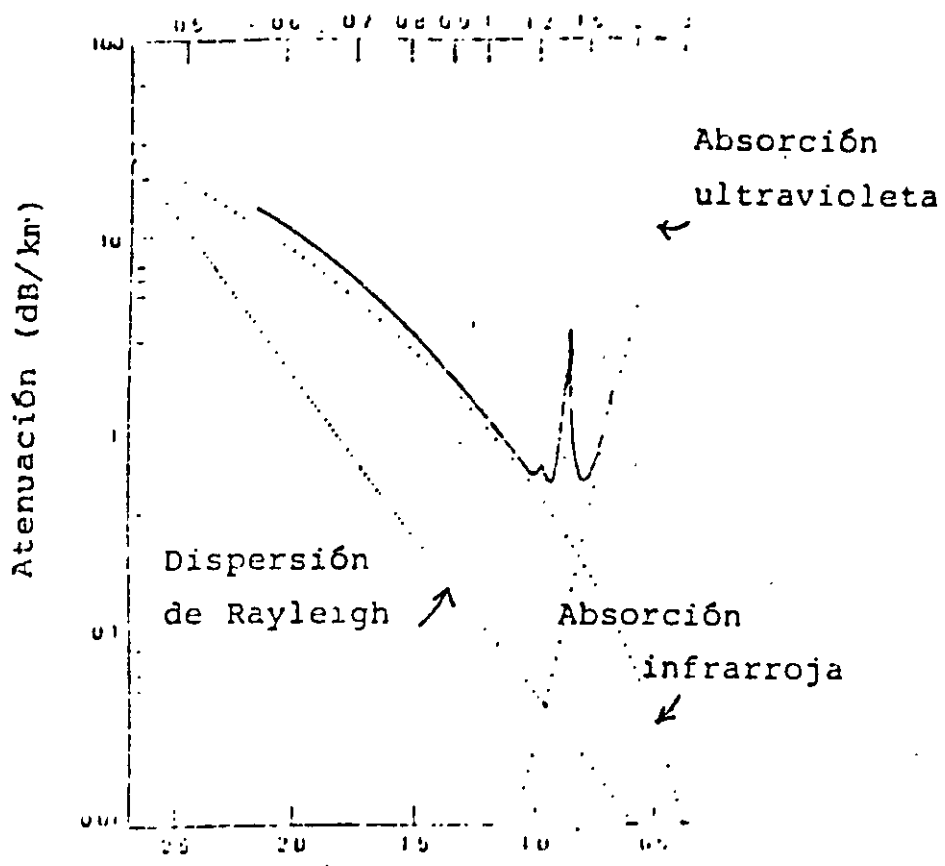


Figura (2.3.9).- Descomposición de pérdidas en absorción y dispersión.

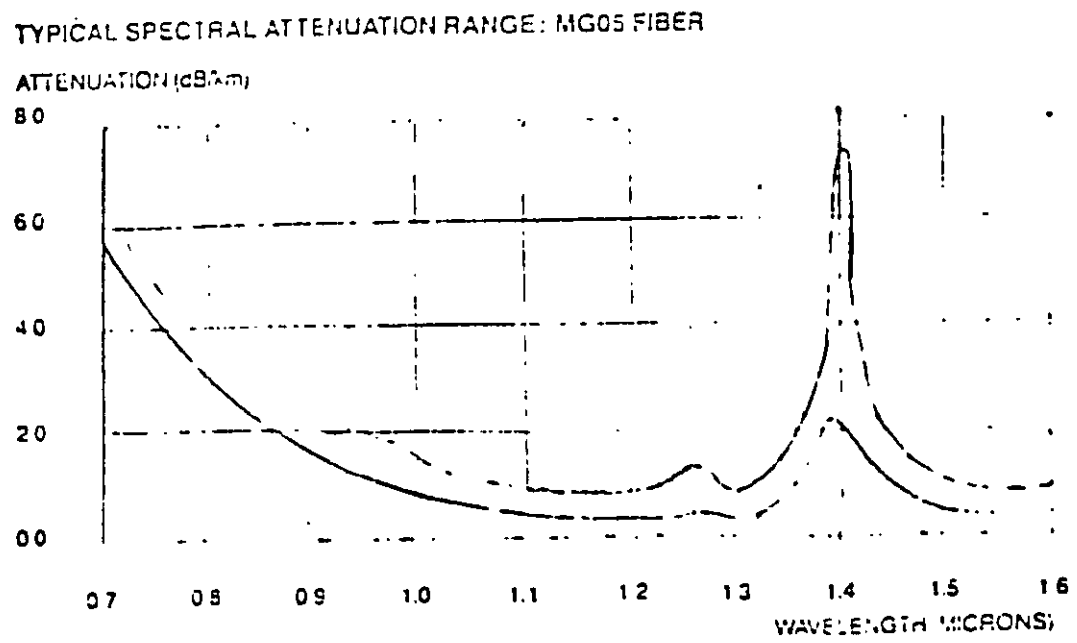
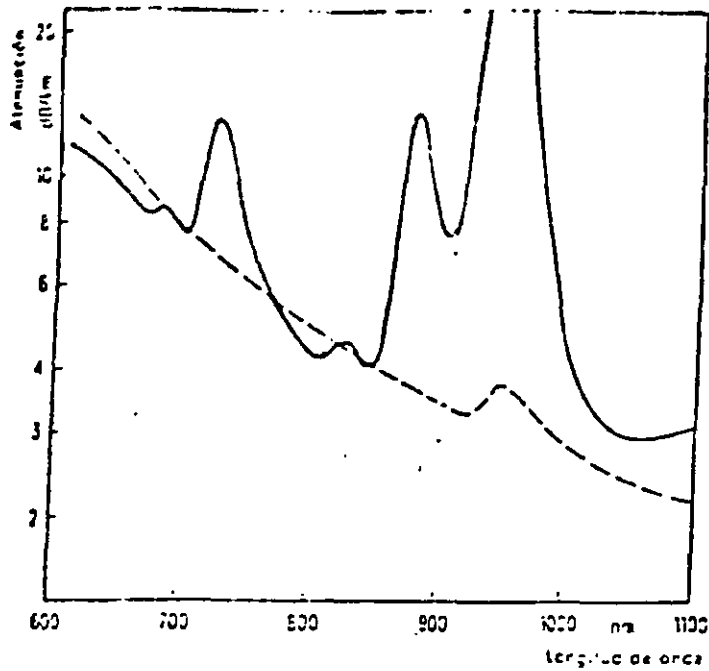


Figura (2.3.10).- Atenuación índice gradual. (VALTEC)



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)

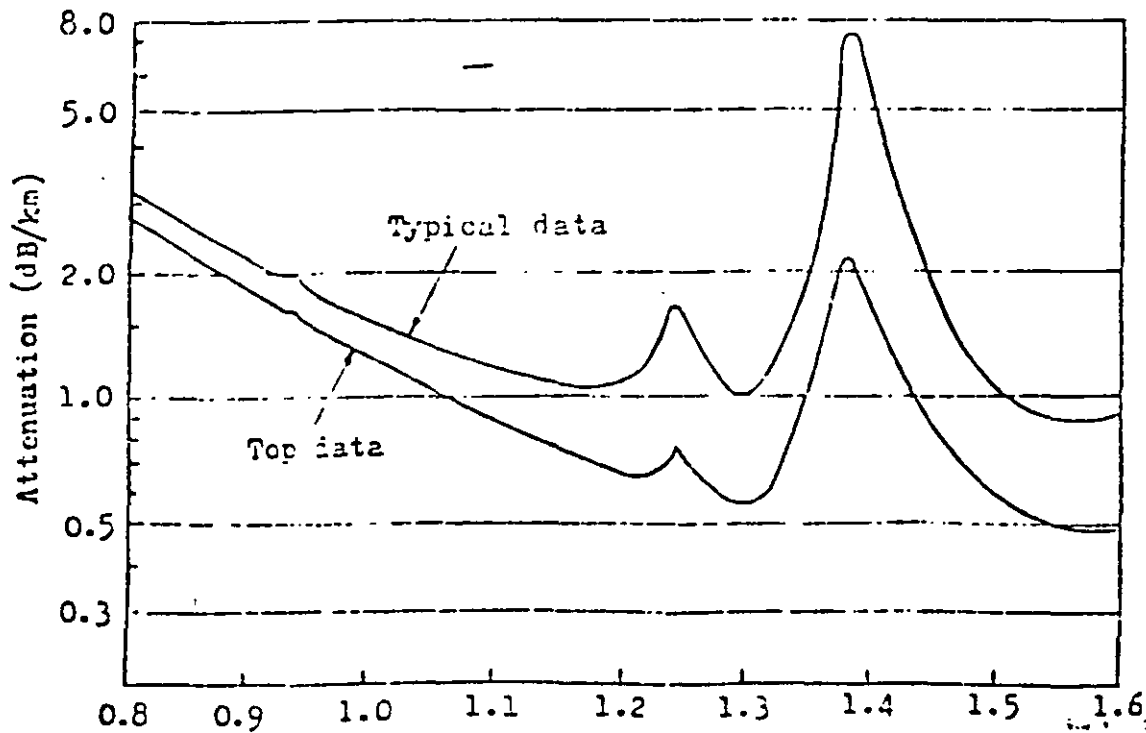
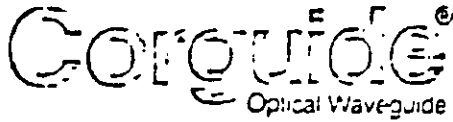


Figura (2.3.12).- Atenuación índice gradual (SUMITOMO)

ING

Telecommunications Products Department
Corning Glass Works
Corning, New York 14831
Tel (607) 974 4411
Telex 932499 (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	< 1400 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.

Analicemos 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

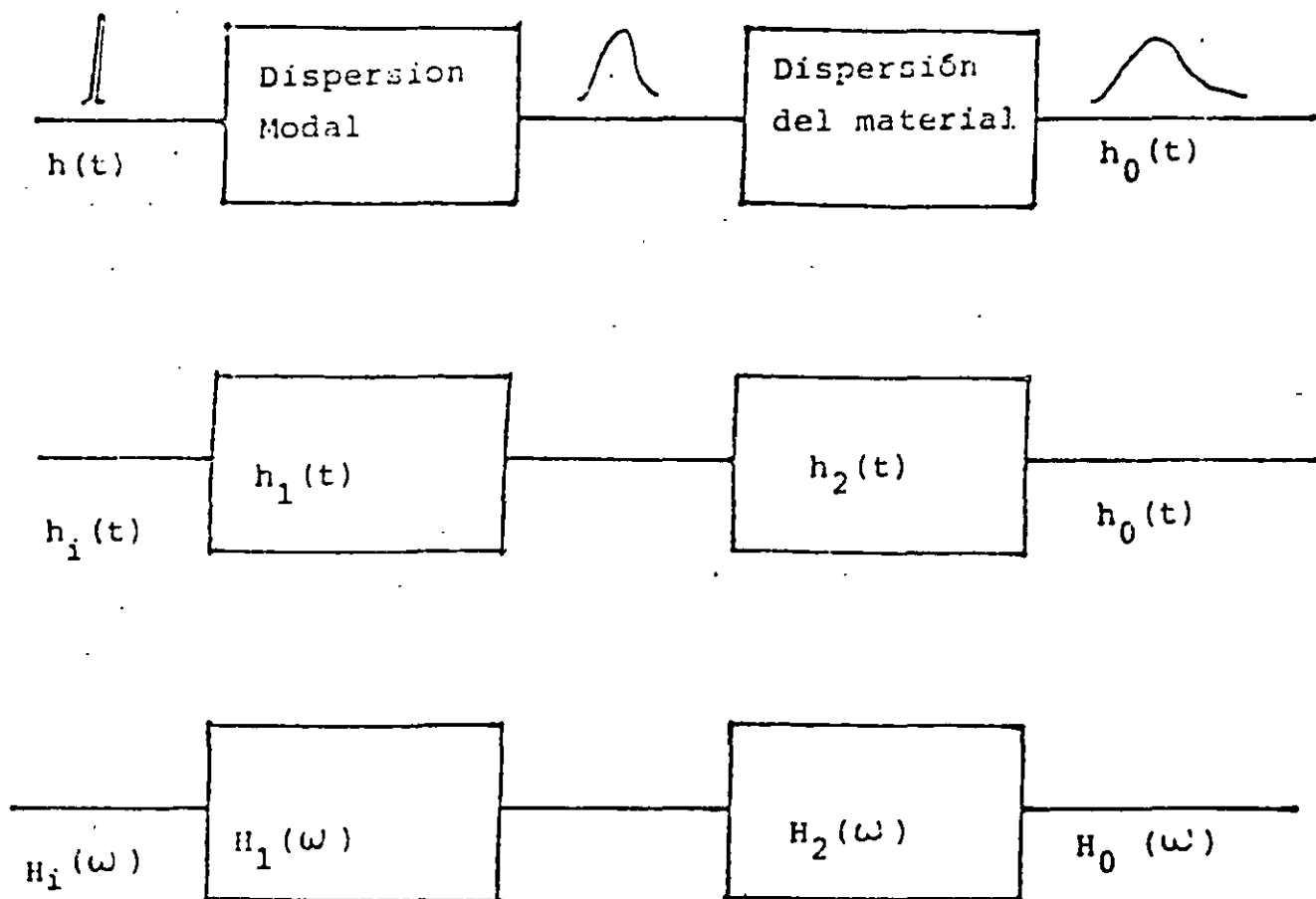


Figura (2.3.14).- Procedimiento de análisis de ancho de banda.

$$P_o = P_n(z) = h_1(t) \iff H_1(\omega) \quad (2.3..)$$

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:

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

La figura (2.3.13) muestra estos casos

Las frecuencias f_1 y f_2 de la figura definen dos formas de caracterizar el ancho de banda f_2 es el ancho de banda de 3dBs ópticos y corresponderá a una disminución de 6 dBs en la corrien

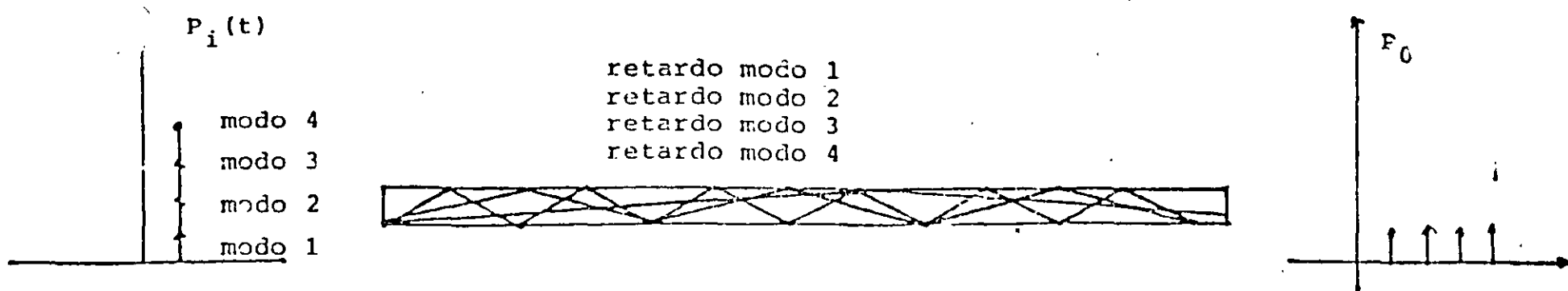


Figura (2.3.15).- Espaciamiento de impulsos modales

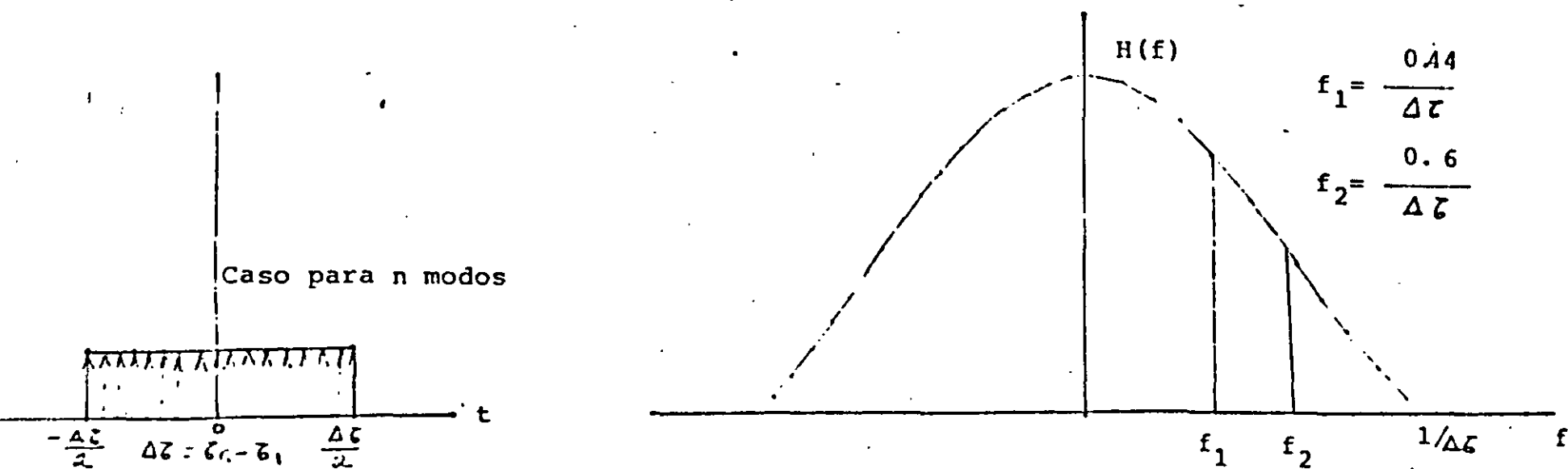


Figura (2.3.16).- Aproximación de la dispersión modal mediante un pulso rectangular de ancho Δz y su transformada de Fourier, indicando f_1 (3 dB eléctricos) y f_2 (3 dB ópticos).

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 $H_2(\omega)$.

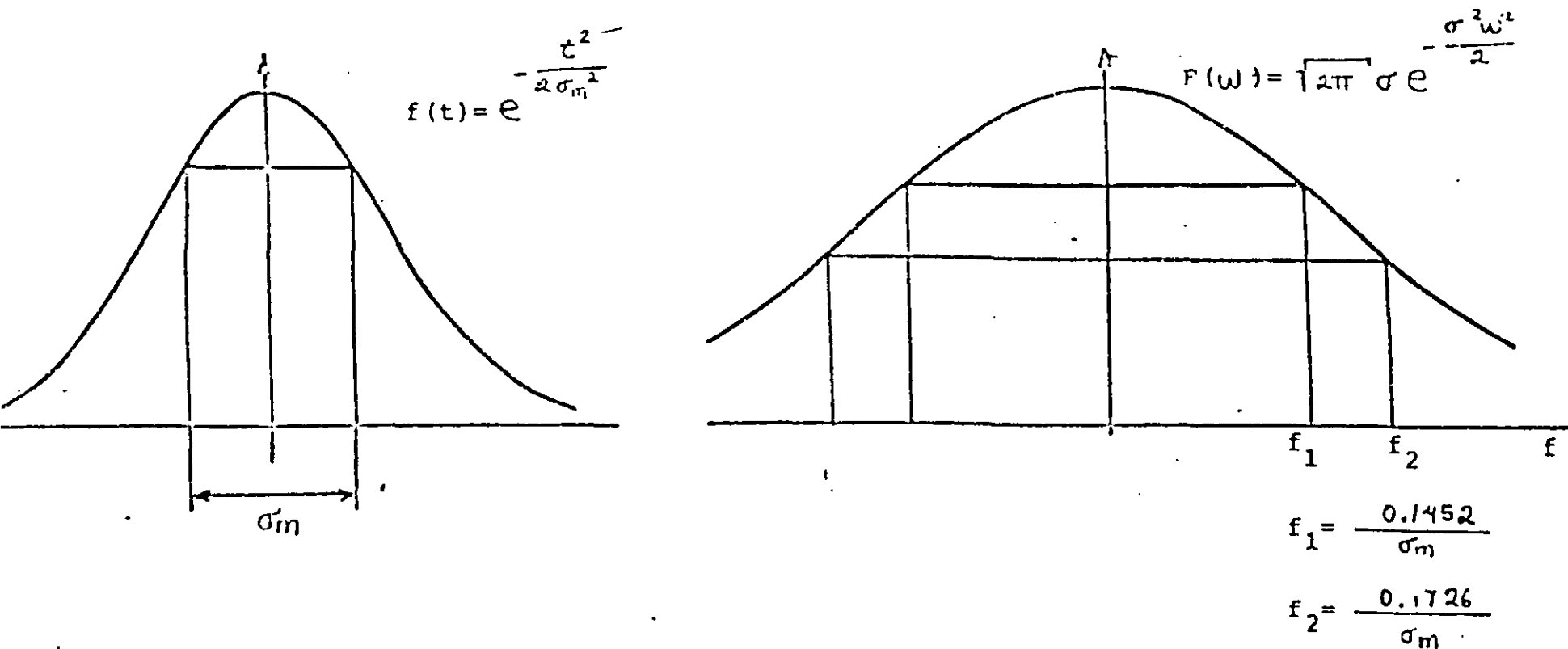


Figura (2.3.17).- Modelo Gaussiano para la dispersión intermodal.

$\sigma_m = \frac{L n_1 \Delta}{2c \sqrt{3}}$ 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

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

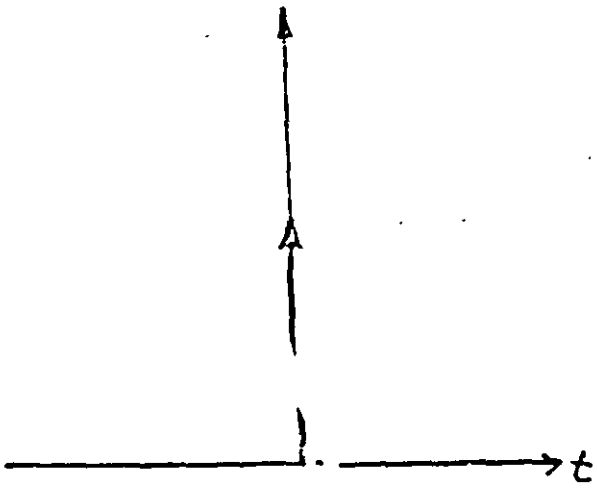
y σ_s será

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

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:

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

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



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

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

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

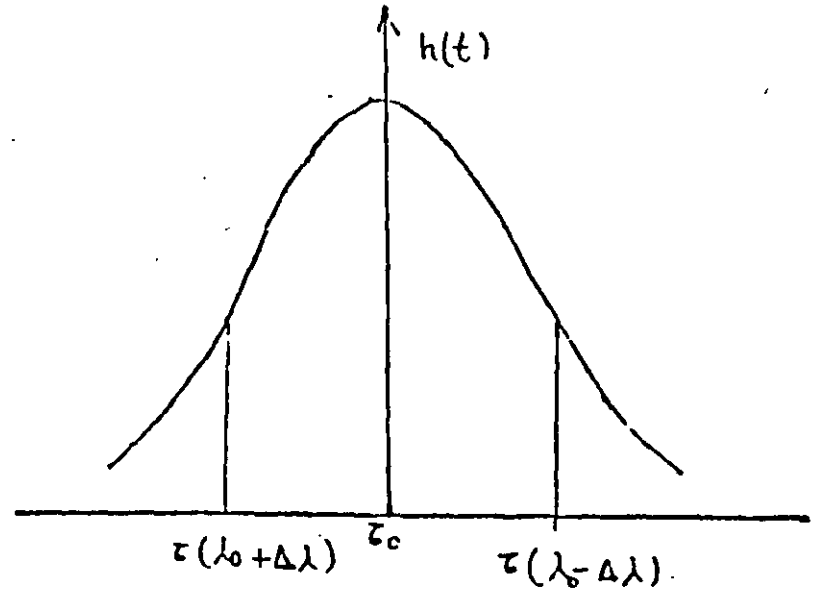
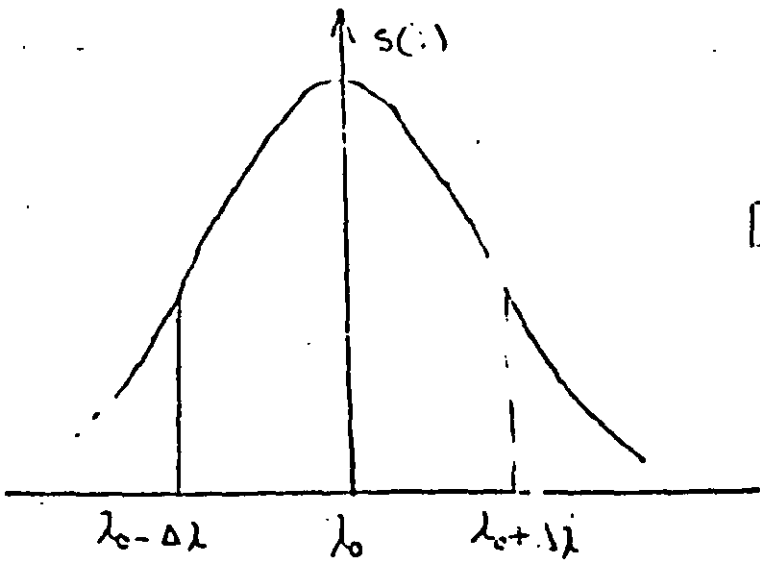
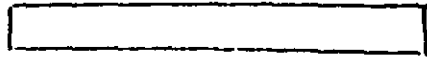


Figura (2.3.18).- Respuesta temporal de una fibra a una excitación con espectro $s(\lambda)$.

Si de acuerdo a esto distribuimos las velocidades de viaje de las diferentes longitudes de onda del emisor tendremos el efecto de la figura (2.3.12)

Por otra parte la potencia que arribará en $\tau(\lambda_0 + \Delta\lambda)$ y en $\tau(\lambda_0 - \Delta\lambda)$ serán proporcionales a $S(\lambda_0 + \Delta\lambda)$ y a $S(\lambda_0 - \Delta\lambda)$. Es por esto completamente lógico pensar que la respuesta al impulso $h_2(t)$ tendrá una forma igual a $S(\lambda)$ pero mapeada al tiempo $S(t)$. Esto se expresa de la siguiente forma .

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

donde

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

y $\delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente.

Esta distribución será normalmente gaussiana.

Cuando el fabricante ofrece sus características de emisores indica generalmente el valor 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 $\Delta\lambda = 2\text{nm}$,

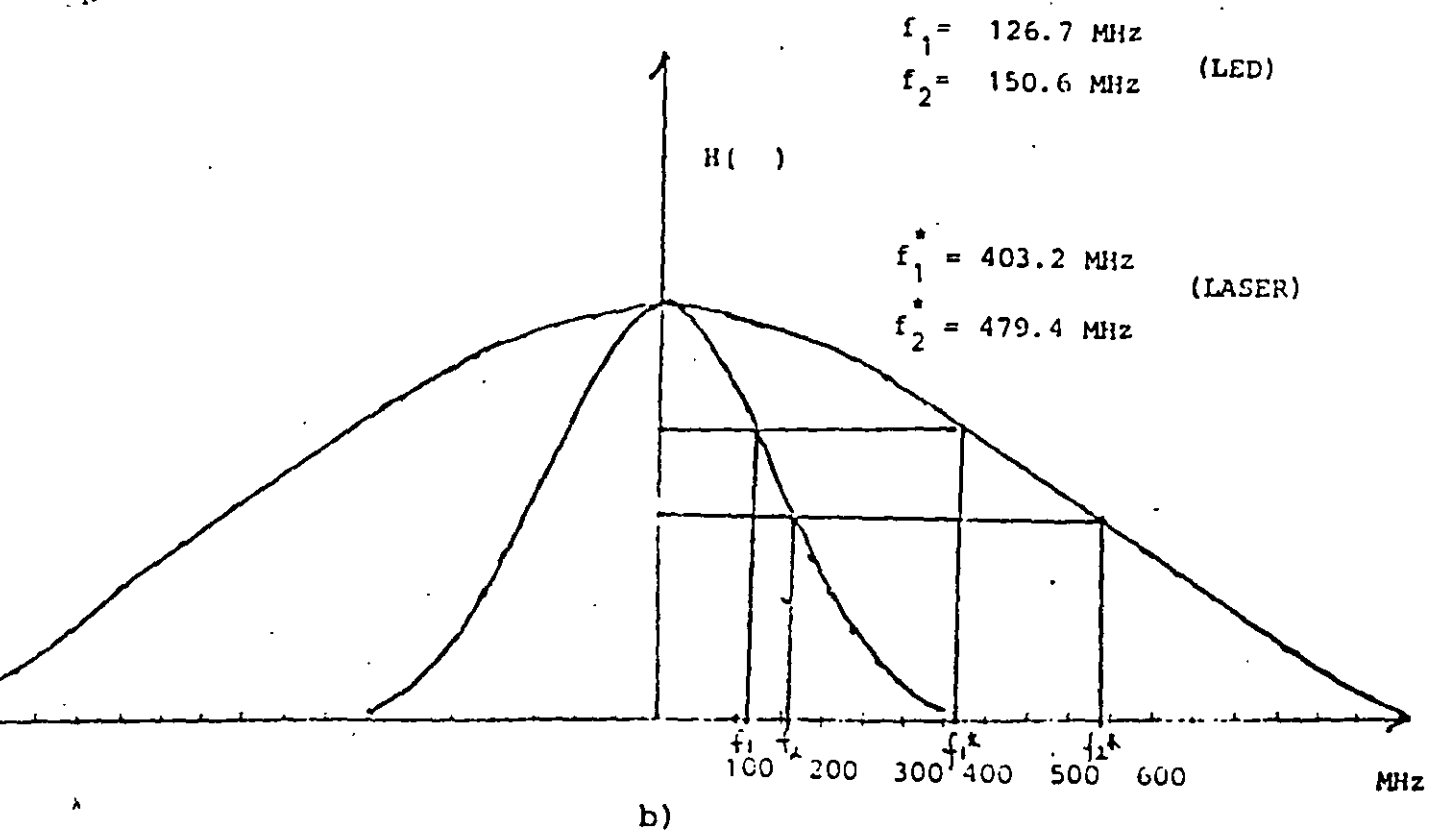
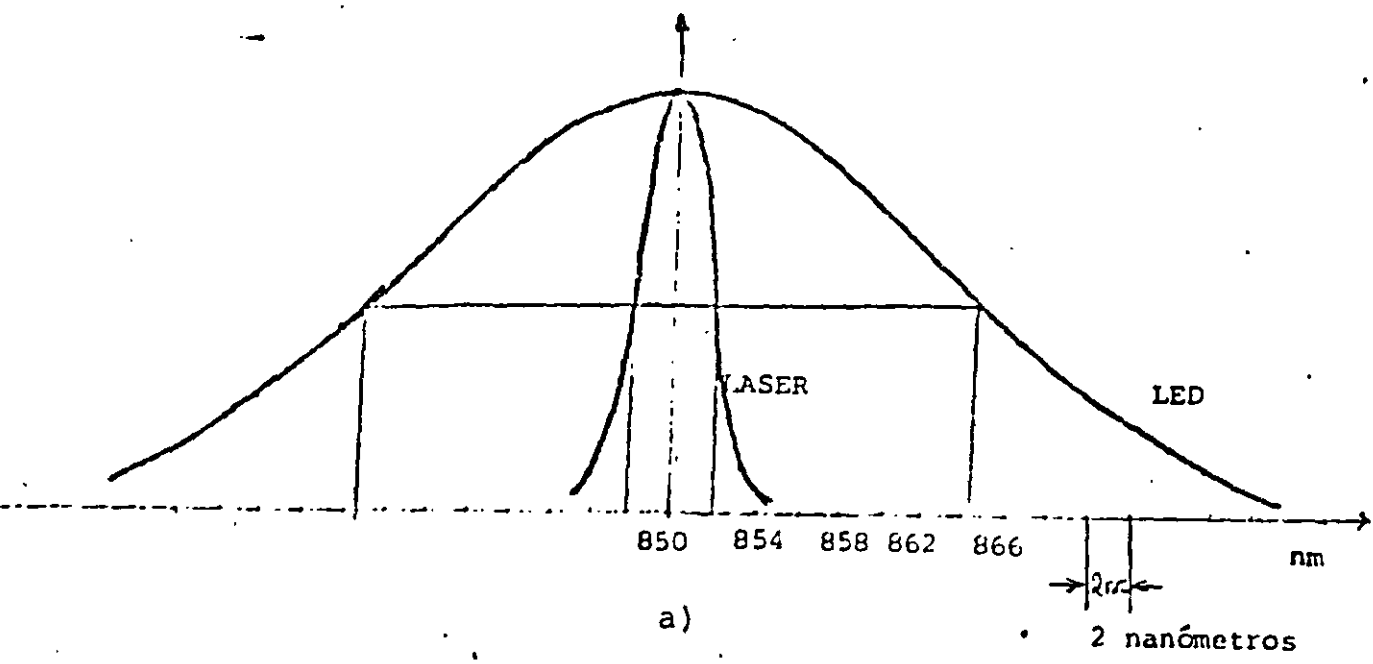


Figura (2.3.19).- Ancho espectral (a) y ancho de banda (b) para un LASER y un LED típicos.

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:

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

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 $M = 160 \frac{\text{p-seg}}{\text{nm-Km}}$

$$B_m = 600 \text{ MHz} \cdot \text{km}$$

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 microdoblecillos 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.

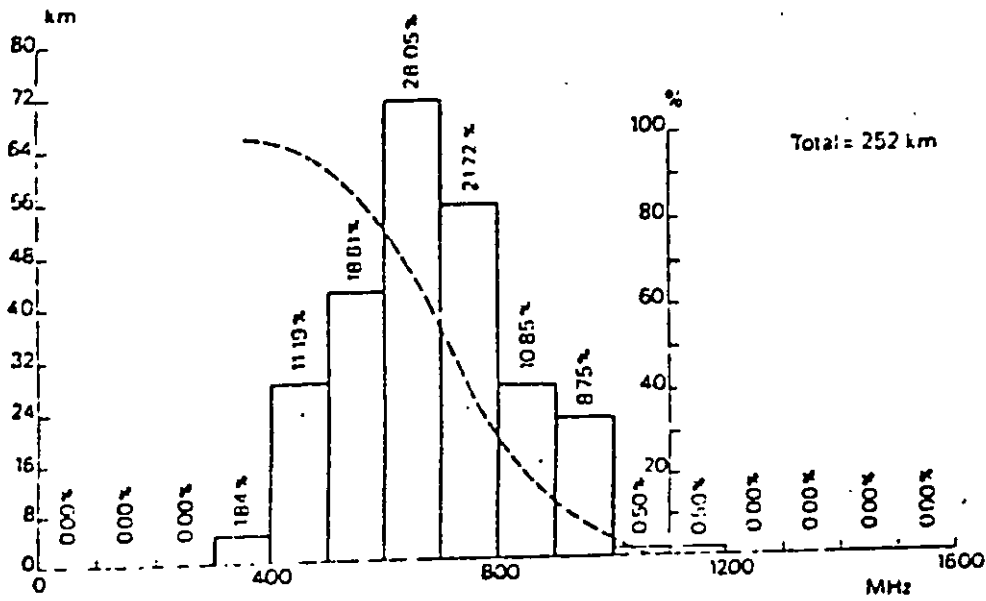


Figura (2.3.20).- Ancho de banda. Histograma.

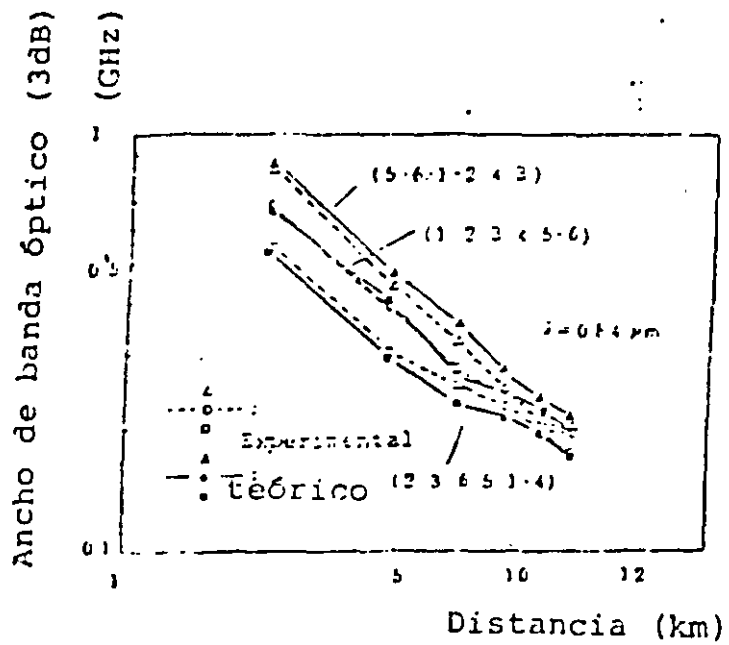
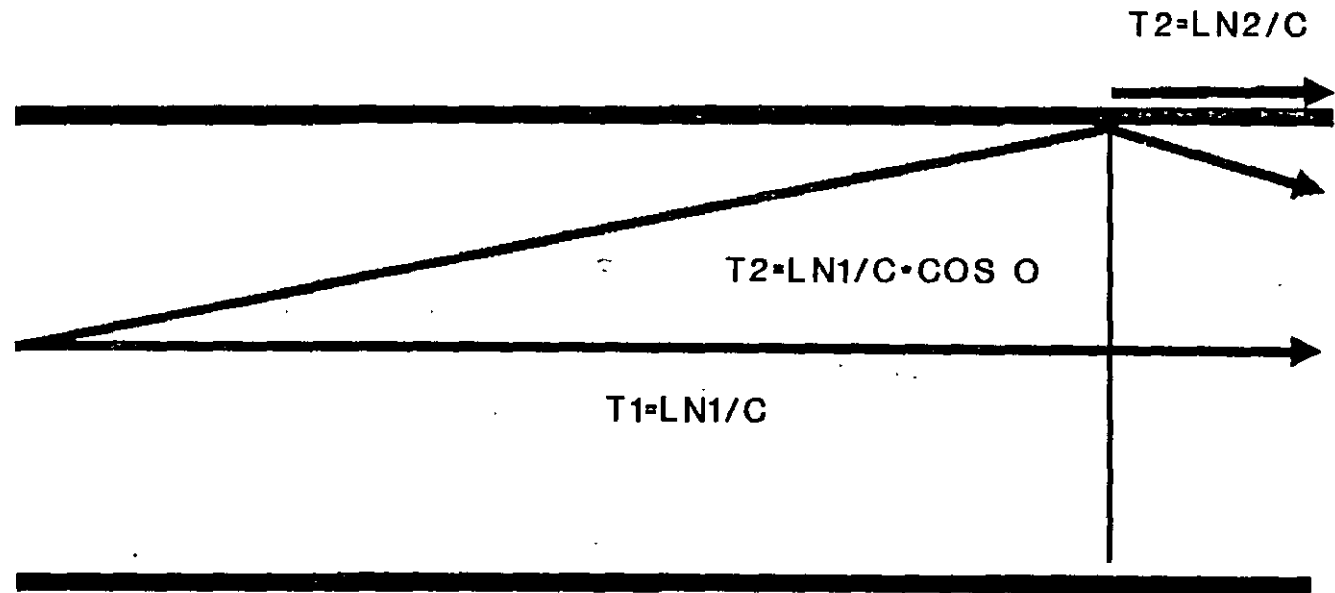


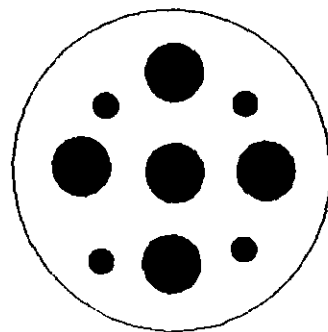
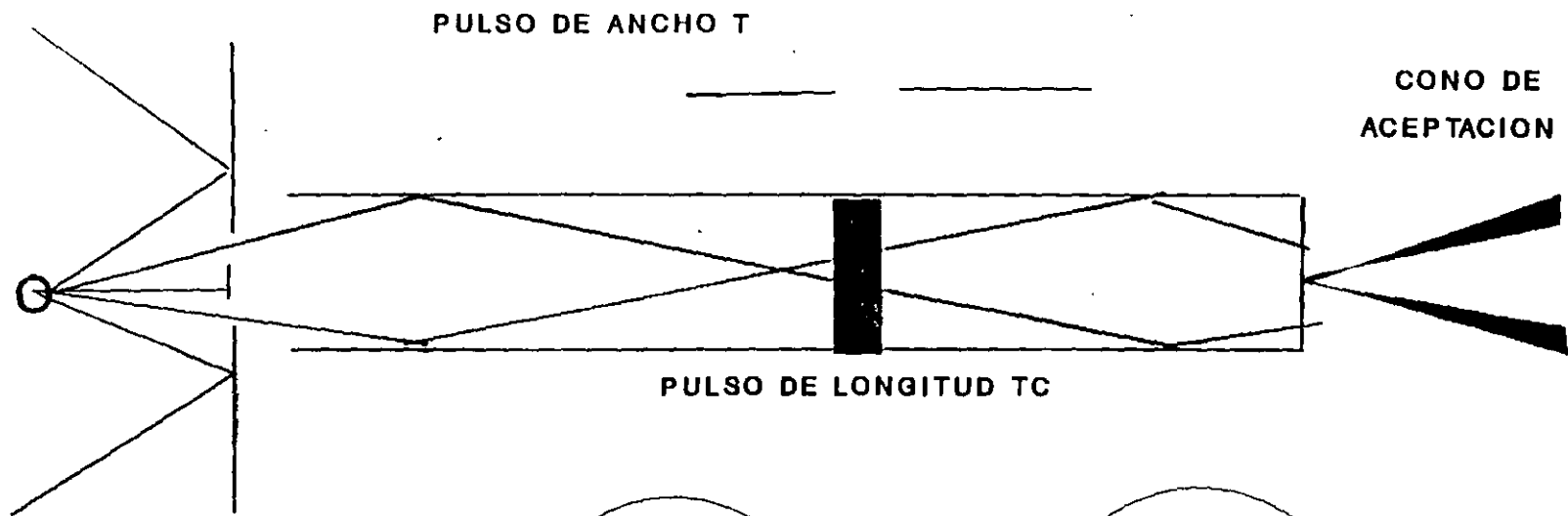
Figura (2.3.21).- Variación del ancho de banda total cuando se cambia el orden de las fibras concatenadas.

DISPERSION INTERMODAL FIBRA MULTIMODO

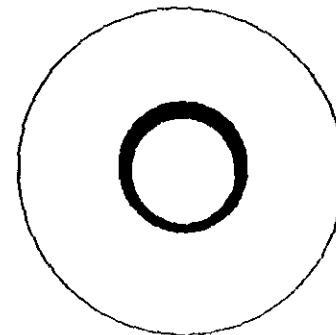


$$T_2 - T_1 = LN_1/C(1 - 1/\cos \theta) = L/C(N_1 - N_2) = LN_1 / C$$

PROPAGACION F.O. MULTIMODO RESTRICCION A UN SOLO MODO



CAMPO CERCANO



CAMPO LEJANO