

77
Lej



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

COMUNICACIONES. LA FIBRA OPTICA COMO
MEDIO DE TRANSMISION DE DATOS

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
ERNESTO SANTOS PAZ

ASESOR: ING. JORGE RAMIREZ RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1999.

TEJES CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

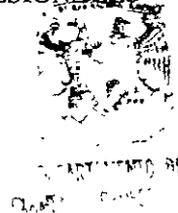
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
PRESENTE.

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Comunicaciones. La fibra óptica como medio de transmisión de datos.

que presenta el pasante: Ernesto Santos Paz

con número de cuenta: 9039322-2 para obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 1 de Diciembre de 19 98

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>I</u>	<u>Ing. Vicente Magaña González</u>	<u>Vicente Magaña</u>
<u>II</u>	<u>Ing. Juan González Vega</u>	<u>Juan González</u>
<u>III</u>	<u>Ing. Jorge Ramírez Rodríguez</u>	<u>Jorge Ramírez</u>

A mis padres:

Guadalupe Santos Ortíz

Gloria Paz de Santos

Por haberme dado el cariño y apoyo necesario para poder lograr todo lo que me propongo.

A mis hermanos:

Alejandro

Sandra

Gerardo

Gloria Haydeé

Por enseñarme a no dejar en creer en mi mismo y aprender de los errores.

A mis amigos

Verónica de León H.

Sergio Martínez C.

Victor F. Mainfelt M.

Y demás compañeros.

Por darme su amistad y ayuda en todo momento.

Por todo esto y mucho más, mi más profundo agradecimiento.

Ernesto Santos Paz

INDICE

Introducción.	1
Capítulo I. Desarrollo histórico de los sistemas de comunicaciones en el rango espectral de la luz.	9
Capítulo II. Leyes generales de la propagación de la luz.	14
Capítulo III. Fibras ópticas.	20
III.1. Clasificación.	20
III.2. Propagación de la luz a través de fibras ópticas.	25
III.3. Atenuación.	27
III.4. Dispersión.	29
III.5. Acoplamiento entre fuente y la fibra.	31
III.6. Parámetros básicos.	33
Capítulo IV. Emisores ópticos.	36
IV.1. Coherentes.	36
IV.2. No coherentes.	40
IV.3. Modulación.	41
Capítulo V. Detectores ópticos.	46
V.1. Principio de funcionamiento del fotodiodo.	47
Capítulo VI. Transmisión de datos por fibra óptica.	50
VI.1. Técnicas de multicanalización.	50
VI.2. Técnicas de regeneración de señales.	54
VI.3. Técnicas de codificación de línea.	60
VI.4. Codificación para protección de errores.	69

INTRODUCCION.

En este apartado veremos los diferentes tipos de sistemas de comunicación que existen así como las ventajas y desventajas que tiene cada uno de ellos.

Como todos los sistemas de comunicaciones, los de fibra óptica también consisten en tres bloques: transmisor, medio de transmisión y receptor. Un diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto se muestra en la figura 1.



Figura 1. Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto.

En el transmisor se genera la información que se desea comunicar y se le da una amplificación para ser enviada a través del medio de transmisión. En este medio es donde sufre una atenuación, distorsión y es susceptible a interferencias electromagnéticas. La fuente de información puede ser cualquier transductor que transforme la manifestación de un fenómeno físico en oscilaciones de voltaje y corriente. Las señales que contienen la información pueden ser analógicas, como las provenientes de un termómetro, de un medidor de presión, etc.; o pueden ser digitales como los provenientes de una computadora. En general todos los transductores generan señales analógicas, pero éstas pueden digitalizarse antes de ser transmitidas a través del medio de comunicación.

Los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar de diferente forma, dependiendo del parámetro de comparación. Por ejemplo, los podemos clasificar por la forma en que se envía el mensaje; ya sea digital o analógico, y puede ser en banda base, o

en una portadora. Otro parámetro muy importante para clasificar los sistemas de comunicaciones es el medio de transmisión que emplean. Dependiendo del medio o canal de transmisión empleado, un sistema puede poseer una o varias características de peculiaridad que lo hace insustituible con respecto a otros sistemas que emplean diferentes medios de comunicación. Por medio de la transmisión los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar en: sistemas de radiocomunicación, sistemas por cable metálico y sistemas por fibra ópticas.

Sistemas de radiocomunicación.

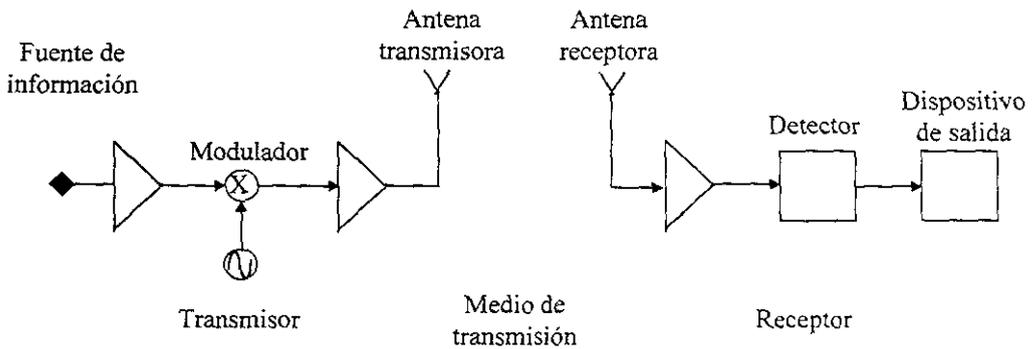


Figura 2. Diagrama a bloques de un sistema de radiocomunicación punto a punto.

Todos los sistemas de comunicación emplean el espacio como medio de transmisión. La información viaja en forma de ondas electromagnéticas no guiadas desde el transmisión hasta el receptor. Para que el transmisor radie energía electromagnética al espacio circunvecino es necesario emplear un transductor, el que transforma ondas de voltaje y corriente u ondas electromagnéticas guiadas en ondas electromagnéticas no guiadas, este transductor es la antena transmisora, que dependiendo de la frecuencia y de la aplicación del sistema puede radiar energía de igual manera en todas las direcciones o en una dirección preferida. En el receptor también se tiene que emplear un transductor que transforme ondas electromagnéticas no guiadas en ondas de voltaje y corriente o en ondas electromagnéticas guiadas. Este transductor es la antena receptora, que

dependiendo de la frecuencia y de la aplicación el sistema puede recibir señales provenientes de todas las direcciones de igual manera o en una dirección preferida. Un diagrama de bloques de un sistema de radiocomunicación punto a punto se ilustra en la figura 2.

El hecho de que los sistemas de radiocomunicación no emplean un medio físico para la transferencia de energía desde el transmisor al receptor, hace que éstos posean una serie de características particulares de ellos y que en ciertas aplicaciones son insustituibles y en otras sería más conveniente emplear sistemas con otros medios de transmisión. Las principales ventajas y limitaciones de los sistemas de radiocomunicación son:

Ventajas:

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

Limitaciones:

- Susceptibilidad a interferencias electromagnéticas.
- Espectro electromagnético limitado.
- Privacidad pequeña.
- Dependencia de las condiciones ambientales

Sistemas de comunicaciones por cable metálico.

Los sistemas de comunicaciones por cable metálico necesitan de un medio físico como canal de transmisión, y éste debe ser conductor de electricidad. Esta propiedad le

da una serie de características a estos sistemas. Un diagrama a bloques de un enlace punto a punto de un sistema de comunicaciones que emplea como medio de transmisión conductores eléctricos (par de alambres, cable coaxial, guía de onda) como se muestra en la figura 3.

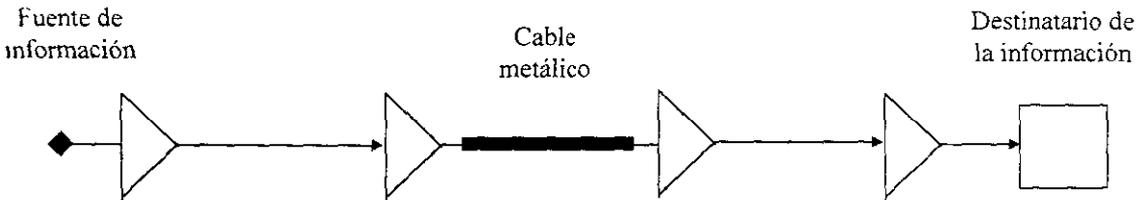


Figura 3. Enlace punto a punto de un sistema por cable metálico.

El hecho de que estos sistemas empleen un medio físico que es un conductor de la electricidad le da una serie de características particulares, las más sobresalientes son:

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

Aquí en el análisis de las características particulares de los sistemas de comunicaciones por cable metálico, algunas de éstas se compararon con los sistemas de radiocomunicación; por ejemplo, mayor privacidad, quiere indicar que la información enviada a través de un sistema de comunicaciones por cable metálico, es más difícil interceptar que si se enviase a través de un sistema de radiocomunicación.

Sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

Los sistemas de comunicaciones por fibra óptica emplean también un medio físico dieléctrico como canal de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de rayos de luz, o sea en ondas electromagnéticas guiadas, la única diferencia con las ondas electromagnéticas de radio es la frecuencia de operación. Como en los sistemas de radiocomunicación, estos sistemas requieren de transductores para el acondicionamiento de la señal útil a transmitirse y recibirse. En el transmisor se requiere de un transductor de ondas de voltaje y corriente en ondas luminosas. en el receptor se requiere de un transductor de ondas luminosas en ondas de voltaje y corriente. Un diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto por fibras ópticas donde se incluyen los elementos básicos de estos sistemas se muestran en la figura 4.

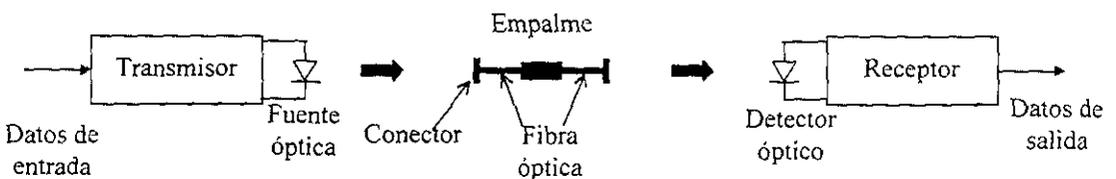


Figura 4. Enlace de comunicaciones punto a punto por fibras ópticas

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

Características y aplicaciones de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

CARACTERISTICA

VENTAJAS

ELIMINACION DE LAS
INTERFERENCIAS
ELECTROMAGNETICAS

Seguridad de alta calidad de transmisión
Reducción de costos de protección contra el ruido
Localización cercana a líneas de alta tensión

AISLAMIENTO
ELECTRICO

Eliminación de los problemas de bucle de tierra
Travesía segura en zonas peligrosas
Seguridad contra descargas eléctricas

PERDIDAS
PEQUEÑAS

Espaciamiento grande entre repetidoras
Confiabilidad grande gracias al número pequeño de repetidoras
Menor mantenimiento

ANCHO DE
BANDA GRANDE

Capacidad grande de transmisión
Eliminación de igualadores
Atenuación independiente del ancho de banda del mensaje transmitido

DIAMETRO Y PESO
PEQUEÑOS

Reducción de los costos de instalación y reparación

ESTABILIDAD EN MEDIOS SEVEROS

Confiabilidad alta de la transmisión
Reducción de la protección contra el medio ambiente

Otras características adicionales:

- Alta privacidad de la transmisión.
- Sensibilidad limitada por el ruido.
- Niveles pequeños de potencia eléctrica en el transmisor.
- Se facilita la movilidad en áreas reducidas.
- Las derivaciones de la fibra óptica son más complicadas e introducen mayores atenuaciones en comparación con las derivaciones con cable eléctrico.
- Interferencia pequeñas entre fibras.
- Cableado de muchas fibras en un solo ducto.
- Mayor economía para enlaces mayores de 2 Km y velocidades mayores a 2MB/s

Principales limitaciones

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

En este trabajo lo que se pretende es analizar las diferentes partes que conforman la fibra óptica para que funcione como un medio de transmisión de datos, al referirse a datos, estamos hablando de toda clase de información que se desee enviar en forma digital.

propagación de la luz a través de la óptica geométrica. En el capítulo III se verán las características de las fibras ópticas y la propagación de la luz a través de ellas, en los capítulos IV y V se verán los diferentes tipos de emisores y detectores ópticos respectivamente y por último en el capítulo VI se analizará las técnicas utilizadas para enviar la información a través de la fibra óptica así como la regeneración de las mismas señales, los códigos de línea y de corrección de errores que se utilizan para un óptima transmisión.

CAPITULO I.

DESARROLLO HISTORICO DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN EL RANGO ESPECTRAL DE LUZ

CAPITULO I. DESARROLLO HISTORICO DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN EL RANGO ESPECTRAL DE LUZ

En el año 1870 Claude Chappe construyó un telégrafo óptico que permitía transmitir información, cubriendo distancias hasta de 200 Km en tan sólo 15 minutos y que fue reemplazado con la llegada del telégrafo eléctrico

En el año 1870, el físico inglés John Tyndall, demuestra ante la British Royal Society, la posibilidad de propagar luz en una trayectoria curvilínea, mediante el fenómeno de la reflexión total, al utilizar como guíaonda el chorro de agua que salía del interior de una botella. La fuente de luz estaba en el interior de la botella.

En el año de 1889, Alexander Graham Bell, inventa un aparato llamado "Photophon",

En el año de 1910 Hondros y Deybe complementan los estudios teóricos sobre la propagación en las guíaondas dieléctricas.

En el año 1927, el británico Baird patenta un aparato capaz de transmitir imágenes en distancias cortas y cuya guíaonda era una varilla de vidrio.

En el año 1934, el norteamericano Norman R. French, patenta un sistema telefónico óptico describiendo cómo las señales de voz se propagarían por medio de una red de conductores ópticos contruidos con varillas rígidas de vidrio, guíaonda. Desgraciadamente, la tecnología de la época, no le permitió llevarlo a la práctica.

En el año 1953, Kapan inventa la fibra de vidrio y la recubre por primera vez de un revestimiento, lo que permite su utilización práctica.

Es la primera vez que se emplea el termino Fibra Óptica.

En el año 1958, Arthur Schawlow Charles H. Townes, desarrollan el LASER y obtienen por su descubrimiento el Premio Nobel.

Con el paso del tiempo el Láser se erigiría como la fuente de luz idónea para las comunicaciones ópticas.

En el año 1959, Hopkins, Van Heel y Kapany, inventan el primer endoscopio para utilización médica realizado con fibras ópticas.

En el año 1960 Theodor H. Maiman, utiliza el láser por primera vez como fuente de luz para las comunicaciones ópticas.

En el año 1962 se desarrollan los láseres con elementos semiconductores así como los fotodiodos usados como receptores.

En el año 1966, los ingleses Charles R. Kao y George A. Hockman, investigadores de Standard Telecommunications Laboratories, proponen la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión.

Mantuvieron que los valores de atenuación que se obtenían en su época, del orden de 1000 dB/km, eran motivados por la escasa pureza de los materiales empleados en la fabricación de la fibra óptica.

Llegaron a predecir que con los procesos adecuados se podrían llegar a obtener valores de atenuación del orden de 20 dB/km.

En el año 1970, los norteamericanos Kapron, Keck Mauer, investigadores de Corning Glass Works, obtuvieron valores de atenuación inferiores a los 20 dB/km.

En el año 1972, en los mismos laboratorios de Corning Glass Works se obtuvieron valores de atenuación de 4 dB/km con una longitud de onda de 800 nm y con fibras ópticas multimodo de perfil escalonado del índice de refracción

En el año 1973, se instaló el primer sistema telefónico experimental. en los barcos de la armada de los EE.UU., que utilizaba como medio de transmisión la fibra óptica

En el año 1976, se instaló el primer sistema telefónico comercial. en la planta de Western Electric, en Atlanta EE.UU., en el que se utilizaba como medio de transmisión la fibra óptica.

En el año 1976, M. Houriguchi de N.T.T. H Osanai de Fujikura. anunciaron el inicio de la producción de fibras ópticas monomodo con una atenuación de 0.47 dB/km para una longitud de onda de 1200 nm.

En el año 1976, Siemens , pone en funcionamiento un tramo experimental para la transmisión de señales bajo norma R.D.S.I. telefonía, televisión, videoteléfono con un vano de 2.1 km en la ciudad de Berlín.

En el año 1977, Hartman. Schumaker Dixon descubren las altas prestaciones del láser de Ga-As-Al, de funcionamiento continuo con larga vida.

En el año 1977, Bell Systems pone en funcionamiento un enlace telefónico óptico con un vano de 2.5 km en Chicago EE.UU..

En el año 1977, General Telephone pone en funcionamiento un enlace telefónico óptico con un vano de 9 km en Long Beach EE.UU.

En el año 1977, el Post Office británico realiza pruebas experimentales con un sistema de transmisión óptico de 140 Mbps en un vano de 9 km entre Hitchin Stevenhage.

En el año 1977, el Deutsche Bundespost pone en servicio un enlace telefónico con un sistema de transmisión óptico de 140 Mbps en un vano de 9 km en Berlín.

En el año 1978, NTT, Nippon Telegraph and Telephone, realiza un enlace experimental óptico con un sistema de transmisión de 32 Mbps. Se utilizó como fuente de luz un láser trabajando en una longitud de onda de 1.270 nm con un vano de 53 km sin repetidores intermedios.

En el año 1979, NTT, realiza un enlace experimental con un sistema de transmisión de 100 Mbps.

Se utilizó como fuente de luz un láser de In-Ga-As-P, trabajando en una longitud de onda de 1500 nm con fibra óptica monomodo en un vano de 29 km sin repetidores intermedios.

En el año 1979, NTT, Nippon Telegraph and Telephone, realiza un enlace experimental con un sistema de transmisión de 40 Mbps.

Se utilizó una fuente de luz láser de In-Ga-As-P, trabajando en una longitud de onda de 1500 nm con fibra óptica monomodo en un vano de 18 km sin repetidores intermedios.

Las fibras ópticas Monomodo comerciales que se utilizan en la actualidad presentan valores de atenuación del orden de 0.3 dB/km.

Los equipos que se utilizan actualmente en las transmisiones ópticas trabajan con velocidades normalizadas de 2 Mbps, 8 Mbps, 34 Mbps, 140 Mbps y 565 Mbps.

Las longitudes de onda de trabajo adoptadas para los equipos de comunicaciones ópticas actualmente están centradas en los 850 nm, 1330 nm y 1550 nm.

Las secciones de regeneración en el caso de las fuentes ópticas equipadas con Diodos Láser son del orden de 50 km.

CAPITULO II. LEYES GENERALES DE LA PROPAGACION DE LA LUZ.

En primer lugar, la propagación de la luz en una fibra óptica puede analizarse mediante el empleo de las leyes de la óptica geométrica. Esta primera aproximación permite definir simplemente una característica importante de la fibra óptica: su apertura numérica. La luz se compone de ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío a una velocidad v del orden de 300 000 Km/s. Estas ondas transportan energía y se caracterizan por sus frecuencias de oscilación f ; asimismo, pueden determinarse por medio de otro parámetro: la longitud de onda λ , que se define como la relación entre su velocidad de propagación y su frecuencia.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Si su longitud de onda está comprendida entre 0.4 μm y 0.8 μm , las ondas electromagnéticas tienen la particularidad de excitar al ojo humano, y de esta forma pueden ser visibles. En tal caso se les designa con el nombre de luz

La óptica es la parte de la física que estudia las propiedades de la luz. Si sólo se tienen en cuenta las trayectorias seguidas por la luz (los rayos), sin considerar la naturaleza física de las ondas electromagnéticas, entonces su estudio pertenece al campo de la óptica geométrica.

La luz puede transmitirse, reflejarse o refractarse en la superficie de separación que existe entre dos medios diferentes (aire, vidrio, plástico...), es decir, su dirección inicial sufre una desviación. En seguida se verán las principales propiedades de la reflexión y de la refracción de la luz.

Leyes de la reflexión.

a) Si la luz incide sobre un espejo (en general metálico), el ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_i (véase la figura II.1.). Los ángulos se midieron con respecto a la perpendicular a la superficie reflectora (AN), en el punto de incidencia A. Esta recta se llama *la normal* a la superficie en el punto A.

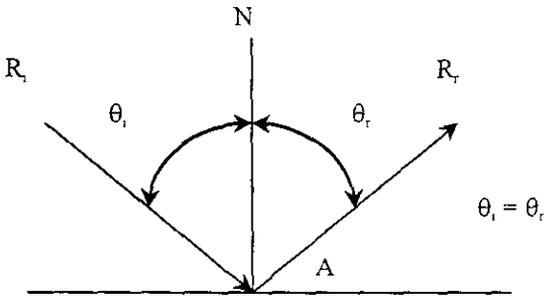


Figura II.1. Reflexión de la luz en un espejo

b) El rayo incidente R_i , el rayo reflejado R_r y la normal AN pertenecen a un mismo plano llamado incidencia.

Leyes de la refracción.

a) En un medio dieléctrico (aislante eléctrico), la luz se propaga a una velocidad v menor, en comparación con la que alcanza en el vacío. La velocidad de propagación en el vacío (c), es aproximadamente igual a 300 000 Km/s. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad en el dieléctrico se llama *índice de refracción* del dieléctrico. Este índice de refracción n es una característica específica del medio. Se tiene entonces:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{con } n > 1$$

b) La luz se desvía (se refracta) cuando atraviesa la interfaz de dos diferentes medios dieléctricos (cuyos índices son n_1 y n_2), de tal forma que (véase figura II.2.):

- El rayo incidente R_1 , el rayo refractado R_2 y la normal AN están en un mismo plano llamado plano de incidencia
- La relación entre el seno del ángulo θ_1 y el seno del ángulo de refracción θ_2 es constante y se define por:

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

La cual se conoce como *ley de Snell*.

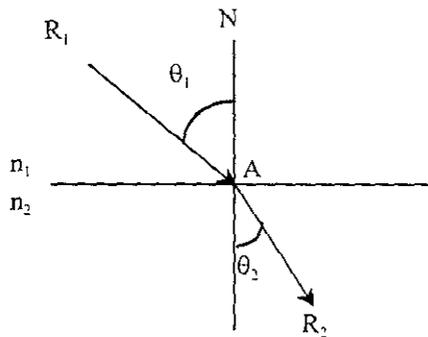


Figura II.2. Refracción de la luz

Fibra óptica. Apertura numérica.

Una fibra óptica es un cilindro de material dieléctrico transparente en el que el índice de refracción n_f es superior al del medio circundante. Como el fenómeno de reflexión interna total se produce en la interfaz entre la fibra y del medio exterior, esta superficie debe definirse bien, no debe tener defectos. La luz que se propaga en la fibra óptica cumple las condiciones de reflexión total, es decir: llega a la interfaz con un ángulo mayor que el ángulo crítico θ_{1c} (valor máximo del ángulo de refracción) Si existe algún

defecto en la interfaz tal vez esta condición no se cumpla, por lo que la luz puede refractarse fuera de la fibra y, en consecuencia perderse.

El cilindro interno, con índice n_1 , se llama núcleo de la fibra. El cilindro externo, con índice n_2 , se conoce como la cubierta o vaina de la fibra.

En la interfaz núcleo-cubierta se producirá la reflexión total interna. Por tanto, siempre es necesario que $n_1 > n_2$. La figura II.3. ilustra el corte longitudinal de una fibra de ese tipo.

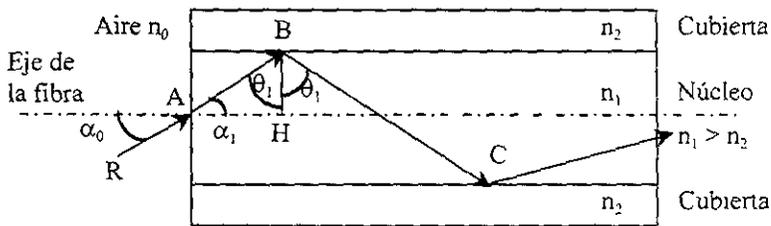


Figura II.3. Corte longitudinal de una fibra óptica.

Un rayo luminoso R , procede de un medio con índice n_0 (pudiera ser el aire) penetra la fibra en A . Este rayo se refracta en ese punto. En B , el rayo experimenta una reflexión total, tendrá otra reflexión total en C y así sucesivamente. Por medio de una sucesión de reflexiones totales, la luz se propaga en zig-zag en la fibra. Se verá para cuales valores del ángulo de entrada α_0 puede ocurrir la propagación.

En A , la ley de Snell señala:

$$n_0 \text{ sen } \alpha_0 = n_1 \text{ sen } \alpha_1$$

Para tener reflexión total en B (después C , D ...) se debe tener:

$$\text{sen } \theta_1 \geq \frac{n_1}{n_2}$$

Como $\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 = 1$, la condición anterior puede escribirse también de la forma:

$$\cos \theta_1 \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

Como $\cos \theta_1 = \sin \alpha_1$ puede escribirse:

$$n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \cos \theta_1$$

De esta forma se obtiene:

$$\sin \alpha_0 \leq \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La desigualdad establece el valor máximo del ángulo de entrada α_0 para que la luz pueda reflejarse totalmente en B y pueda, de esa forma, propagarse.

El ángulo máximo de entrada α_{0M} está dado por:

$$\sin \alpha_{0M} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Todo rayo luminoso que llegue a la cara de entrada de la fibra con un ángulo menor que α_{0M} -definido por la ecuación anterior- se propagará. Esta luz está contenida en un cono, cuyo ángulo medio con vértice es α_{0M} , llamado *cono de admisión* o *cono de aceptación*.

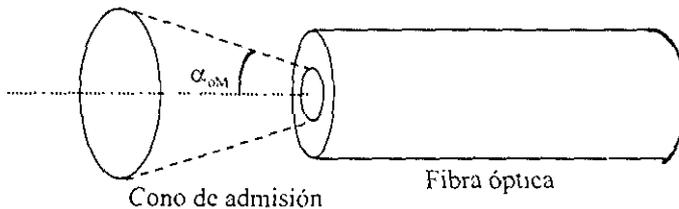


Figura II.4. Cono de admisión de una fibra.

En general, el medio que rodea a la fibra está constituido por aire y, por tanto, puede tomar $n_0 = 1.0$. Entonces el ángulo máximo de entrada esta dado por.

$$\text{sen } \alpha_{0M} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Este importante ángulo determina la capacidad de la fibra para propagar la luz. Por analogía con los instrumentos de óptica, se define un parámetro llamado *apertura numérica* geométrica de la fibra, y que es igual a $n_0 \text{sen } \alpha_{0M}$. En el caso en que el medio externo sea el aire, la apertura numérica (*A.N.*) está dada por:

$$A.N. = \text{sen } \alpha_{0M} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

El concepto de apertura numérica es de extrema importancia , ya que corresponde a la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla.

CAPITULO III. FIBRAS OPTICAS.

III.1. Clasificación.

En la actualidad se cuenta con tres tipos fundamentales de fibra: de salto de índice multimodo, de índice gradual multimodo y la monomodo. Las fibras de salto de índice poseen menor capacidad para la transmisión que los otros dos tipos, pudiendo determinar como los valores típicos de ancho de banda que una fibra de salto de índice dispone de unos 50 MHz/km, la de índice gradual entre 100 y 1000 MHz/km, mientras que la monomodo supera los 10 GHz/km.

Fibra monomodo.

Los inconvenientes que ofrecía la fibra sin forro la de mayor sencillez, realizada en 1910, que resultó inaprovechable debido a su reducido poder de transmisión de luz se han eliminado por medio de su revestimiento, con un índice de refracción ligeramente más débil que el de su núcleo.

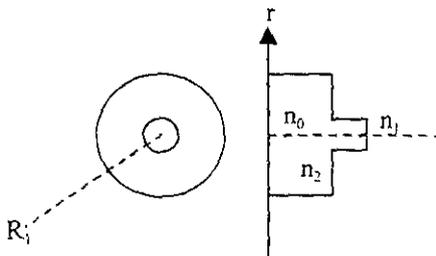


Figura III.1.1. Fibra forrada monomodo.

Las fibras monomodo, cuya sección reproducimos en la figura III.1.1., no se diferencian de las multimodo más que por la notable reducción de su núcleo, que tiene un diámetro que se corresponde con la longitud de onda utilizada, en tanto que el del forro, mucho mayor, es compatible con la rigidez mecánica del conjunto

La propagación se determina por las soluciones de las ecuaciones de Maxwell, que no tienen aplicación cuando el diámetro del núcleo es excesivo con relación a la longitud de onda.

En la figura III.1.2 se pone de manifiesto la forma de propagación de una señal luminosa en una fibra monomodo, con un núcleo tan reducido que permite una sola modalidad de transmisión, pero sin excesiva deformación de los impulsos ópticos, incluso del orden del nanosegundo; la banda pasante correspondiente es del orden del gigahercio.

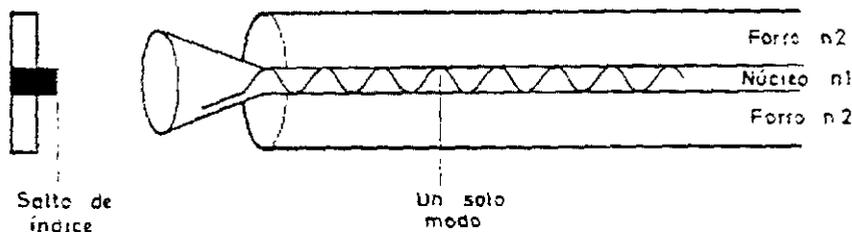


Figura III.1.2. Fibra monomodo de salto de índice

Fibra de gradiente de índice.

En otro tipo de fibra, en este caso el denominado de gradiente de índice, la ley de su variación, casi constante en su parte central, presenta en su máximo casi en los bordes.

No se trata de una estructura excepcionalmente óptima, pero el rendimiento es bastante bueno al conseguirse una atenuación que no llega a 6 decibelios por kilómetro. En la figura III.1.3 se aprecia la sección de este tipo de fibra, y en la figura III.1.4 se observa una reproducción de cómo se conduce la luz, teniendo en modo 1 el camino más largo a velocidad extrema; en dos el camino menos largo a mayor velocidad y en 3, el camino todavía más corto a menor velocidad.

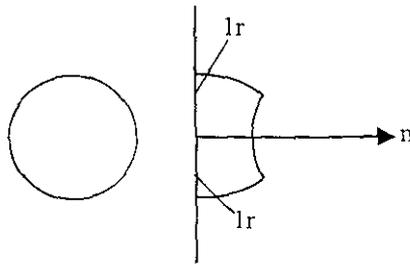
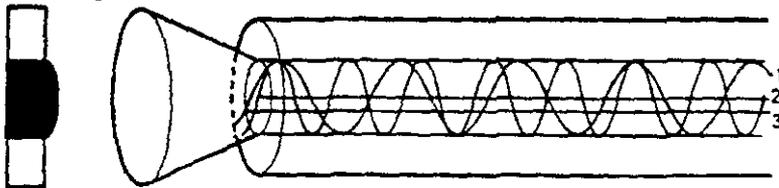


Figura III.1.3. Fibra de gradiente de índice.

Gradiente de índice



- 1 Modo - Camino más largo - extrema velocidad
- 2 Modo - Camino menos largo - mayor velocidad
- 3 Modo - Camino más corto - menor velocidad

Figura III.1.4. Fibra multimodo de gradiente de índice.

Fibras multimodo de salto de índice.

Este tipo de fibras se caracteriza por el inconveniente de que la distancia total recorrida por el rayo luminoso es ligeramente distinta para cada modo, lo que determina que el tiempo necesario para efectuar el recorrido sea también distinto, con el resultado de que un impulso luminoso de muy breve duración entregado a una fibra óptica de varios kilómetros llegaría considerablemente retardado

Con ello se limita la frecuencia a la cual es posible mandar estos impulsos tratándose de un problema que, si bien puede carecer de importancia en determinadas aplicaciones o para distancias relativamente cortas, al tratarse de trayectos de mayor longitud ofrece más inconvenientes.

En la figura III.1.5 se reproduce una fibra multimodo de salto de índice apreciándose que el rayo indicado como sigue el camino más corto y, en consecuencia, llega en primer lugar.

Luego, el rayo 2 discurre por un camino de mayor longitud. llegando con cierto retardo y últimamente, el indicado con 3, es todavía más largo, llegando con mayor retraso. En la figura III.1.6. se reproduce una fibra multimodo de salto de índice.

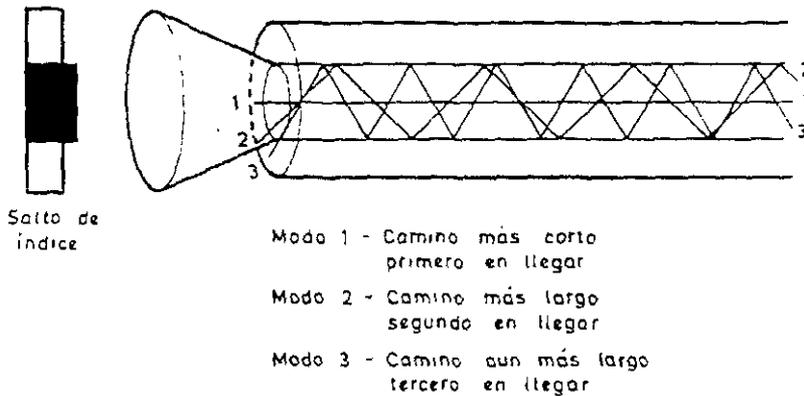


Figura III.1.5. Fibra multimodo de salto de índice.

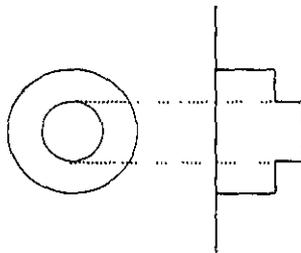


Figura III.1.6. Sección de fibra multimodo de salto de índice.

Las fibras multimodo cuyos tipos más corrientes son las de índice gradual y las de índice por pasos son las más utilizadas, se caracterizan por un núcleo de diámetro mayor que el de las monomodo y aceptan la luz en una amplia variedad de ángulos.

Fibras de índice gradual.

Se trata también de tipo multimodo, caracterizada por una dispersión modal bastante reducida, cuyo índice de refracción varía en sentido progresivo a partir de un elevado valor en el centro del núcleo hasta un bajo valor en el recubrimiento.

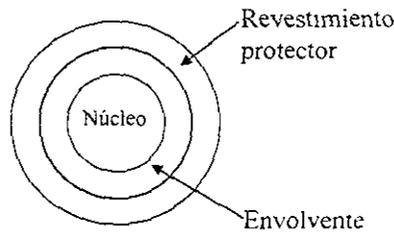


Figura III.1.7. Fibra multimodo.

Debido a estas características, los haces luminosos sufren una modificación en su trayectoria, volviendo hacia el centro antes de chocar con la envoltente, debido a que la velocidad de la luz es menor en el centro mientras que aumenta conforme se aleja de él.

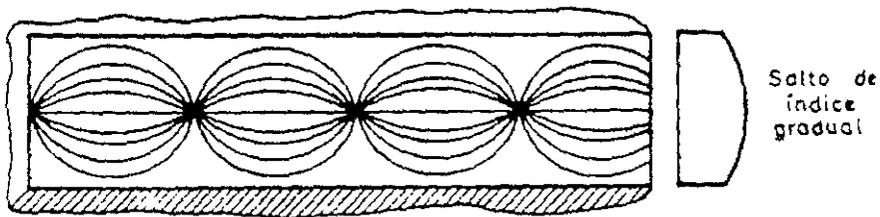


Figura III.1.8. Trayectoria que sigue la luz en una fibra multimodo de salto de índice gradual

Puede apreciarse en la figura III.1.7 el corte de esta fibra multimodo y en la figura III.1.8 muestra la trayectoria que sigue la luz.

Fibra de índice por pasos.

Este tipo de fibras multimodo están constituidas por un núcleo con un elevado índice refractor una capa envolvente con un reducido índice de refracción, lo que determina una transferencia brusca en la transición entre ambas partes. La luz se desplaza por la zona envolvente de ella pasa al núcleo a causa del distinto índice de refracción, apreciándose esta trayectoria en la figura III.1.9.

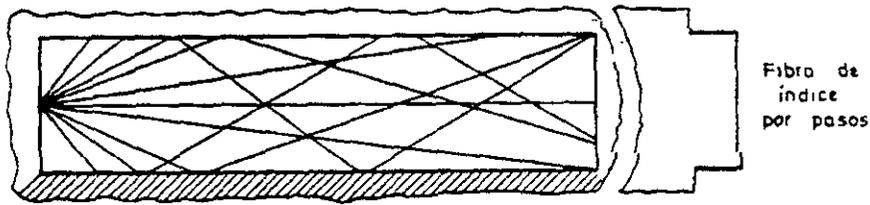


Figura III.1.9. Trayectoria de la luz en fibra multimodo de índice por pasos.

Como sea que el diámetro del núcleo se caracteriza por ser relativamente elevado la trayectoria de la luz no se modifica hasta que ha chocado el rayo con la envolvente, esta fibra tiene una dispersión modal muy elevada. Otra ventaja de esta fibra radica en el hecho de su facilidad de fabricación al ser sencilla su estructura, lo que determina que su coste sea más reducido que el de otros tipos.

III.2. Propagación de la luz a través de fibras ópticas.

Una fibra óptica es una guía de onda de forma cilíndrica. Las propiedades de conducción sólo pueden determinarse con rigor si se aplican las ecuaciones de Maxwell en este medio dieléctrico de geometría cilíndrica. Es un problema complejo por lo que aquí sólo se darán los principales resultados prácticos de este estudio

Modos de propagación.

Por causa de la geometría cilíndrica, los modos (ondas) que se propagan en una fibra óptica siempre tienen componentes de campos eléctrico y magnéticos a lo largo del eje de la fibra. Sin embargo, estos componentes longitudinales son menores que los componentes transversales.

Además de los modos normales que se propagan en el núcleo, ciertos modos llamados *-modos de fuga-* pueden propagarse si siguen parcialmente las trayectorias helicoidales en el núcleo de la fibra, pero sobre todo, si esto sucede en la cubierta. Su propagación depende de la naturaleza de la interfaz entre la cubierta y el exterior (aire o capa protectora de la fibra). Los modos pueden subsistir en distancias que varían desde algunos milímetros hasta varios metros, en función de las fibras.

Frecuencia normalizada.

Con el fin de generalizar y de poder comparar los fenómenos de propagación en las fibras que tiene radios de núcleo a diferentes, e índices de núcleo n_1 y de cubierta n_2 diferentes, se introduce un parámetro llamado *frecuencia normalizada* V definida como sigue:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Este parámetro puede asociarse con la apertura numérica geométrica A.N., que es un parámetro característico de la fibra.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (A.N.)$$

Igualmente se puede determinar el número de modos M

$$M = \frac{V^2}{2}$$

Potencia transportada.

La aplicación de la teoría electromagnética muestra que, para un modo dado en una fibra óptica, una parte de la potencia transportada se encuentra en la cubierta. La relación entre la potencia total del modo y la potencia transportada efectivamente en la cubierta aumenta a medida que el orden del modo disminuye. Esto tiene consecuencias en la fabricación de la fibra ya que es necesario que la cubierta sea de muy buena calidad para evitar que se perturbe la propagación. Esto es tan cierto como el número de modos transportados es pequeño. Para una fibra que tienen un gran número de modos, casi toda la potencia óptica se transporta en el núcleo de la fibra; lo cual tiene concordancia con los resultados de la óptica geométrica para fibras cuyos diámetros son grandes con respecto a la longitud de onda.

Acoplamiento de modos. Distancia de equilibrio.

Al inyectar luz en una fibra óptica siguiendo una dirección determinada, se introduce un modo bien definido en la fibra. Quizá se piense que no se recobrarán más de este modo o esta dirección de propagación al final de la fibra. Esto sería cierto en el caso de una fibra ideal, sin defectos. En la práctica, una fibra presenta cierto número de defectos que hacen que se produzca una mezcla entre diversas direcciones o ángulos de propagación permitidos; en esas condiciones se dice que hay *acoplamiento de modos*. Los defectos principales que se pueden dar origen a este acoplamiento de modos son las microcurvas y la difusión.

III.3. Atenuación.

Una onda electromagnética transporta energía. Todos los días se siente el calor radiado por el sol. En el vacío, en ausencia de toda materia, esta energía se propaga sin ninguna modificación. Sin embargo, tan pronto como una onda electromagnética

interacciona con la materia, la energía transportada por la onda se modifica. Esta modificación puede tomar dos aspectos.

La onda puede ser absorbida, lo que significa que la energía de la onda electromagnética se transforma en calor. Es lo que sucede cuando uno se expone a los rayos de el sol. El cuerpo absorbe una parte de las ondas electromagnéticas que emite el sol, lo que proporciona una agradable sensación de calor.

La onda puede ser difundida de igual manera, en cuyo caso la energía se distribuye en todas direcciones. Estos dos fenómenos, la absorción y la difusión, contribuyen a la atenuación de la luz que se propaga en una fibra.

La atenuación de una fibra óptica es la tasa de decrecimiento de la potencia óptica media con respecto a la distancia a lo largo de la fibra óptica.

La expresión que especifica el C.C.I.T.T. para su cálculo es la siguiente:

$$P [z] = P [z = 0] 10^{-\left[\frac{\alpha z}{10}\right]}$$

Ecuación en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- $P(z)$ Potencia a la distancia z medida desde el origen de la fibra óptica [dB]
- $P(z = 0)$ Potencia en el origen o potencia óptica insertada en la fibra óptica [dB]
- αz Coeficiente de atenuación expresado en dB/km si la distancia z se expresa en km

Coefficiente de Atenuación.

El coeficiente de atenuación expresa la atenuación por unidad de longitud en una fibra óptica.

La expresión que especifica el C.C.I.T.T. para su cálculo es la siguiente:

$$\alpha = \frac{-10 \log_{10} \left[\frac{P(z)}{P(z=0)} \right]}{z}$$

Ecuación en la que la notación utilizada es idéntica a la de la expresión anterior.

Métodos de medición de la atenuación del coeficiente de atenuación.

Las mediciones de atenuación tienen por objeto proporcionar un medio de cuantificar el valor del coeficiente de atenuación de un tramo de fibra óptica.

Seguidamente los valores de atenuación de cada tramo se utilizan para determinar la atenuación de cada tramo se utilizan para determinar la atenuación total o el valor del coeficiente de atenuación de un cable óptico compuesto de varios tramos concatenados.

Los tres métodos sugeridos por el C.C.I.T.T. en las recomendaciones G-651 y G-652 para realizar las mediciones de atenuación en las fibras ópticas son las siguientes

- Técnica de la fibra cortada
- Técnica de la fibra por inserción.
- Técnica del retroesparcimiento.

III.4. Dispersión.

En un sistema de telecomunicaciones, la fibra óptica constituye el canal de transmisión. Este canal debe estar en condiciones de transportar el máximo de información por unidad de tiempo. La frecuencia de la luz posibilita una extraordinaria capacidad de transporte de información. Es importante saber si el hecho de canalizar la

luz en una fibra no reduce la banda pasante del canal óptico, y comprender la forma en que se puede remediar este defecto.

La fibra óptica se utiliza como canal de transmisión de información: es necesario que la luz introducida a la fibra pueda modularse a muy alta frecuencia, e igualmente el detector debe tener un tiempo de respuesta sumamente rápido para poder seguir la señal óptica procedente de la fibra. Es importante saber si la fibra tiene un ancho de banda suficiente y ver cuáles serían los fenómenos físicos que pudiesen limitar esta banda de paso.

Se puede realizar la transmisión digital en la fibra óptica, en cuyo caso, la información que circula por la fibra tiene la forma de pulso de luz. Al "cero" numérico -o señal baja- le corresponde una ausencia de luz, mientras que al "uno" numérico -señal alta- le corresponde una presencia de luz. La información se transmite entonces por secuencias de pulsos luminosos en la fibra. Entre más pulsos luminosos por unidad de tiempo sea posible inyectar, mayor será la capacidad de transmisión de la fibra. Para que la información luminosa pueda utilizarse en un extremo de la fibra, es necesario, primero, que la atenuación de la luz no sea demasiado grande, y además que la información pueda reconocerse; es decir, que pueda distinguirse si la señal que llega es alta o baja. Es necesario que la información no haya sido modificada, de manera que puedan diferenciarse los pulsos. Si en la fibra se llega a producir un alargamiento en la duración de los impulsos luminosos, pueden mezclarse dos puntos sucesivos diferentes en la entrada de la fibra y con esto hacer que la información se pierda.

Este alargamiento de los pulsos obliga a aumentar el tiempo entre dos pulsos sucesivos, por lo tanto, a reducir su ciclo de trabajo y en consecuencia la capacidad de transmisión de información. A este alargamiento de los pulsos se le llama *dispersión temporal*, la cual limita la banda pasante. Las fibras ópticas presentan este inconveniente. La duración del pulso luminosos aumentará durante su trayecto en la fibra.

En una fibra óptica no todos los modos se propagan siguiendo las mismas trayectorias. Los modos de orden pequeño van prácticamente en línea recta, mientras que los de orden elevado reciben un gran número de reflexiones totales, así que tienen trayectorias en zig-zag. Esta diferencia de tiempo que tardan los diversos modos en recorrer una longitud dada de fibra es la *dispersión modal* de una fibra

Las fuentes de luz nunca son monocromáticas. La luz emitida por estas fuentes está constituida por la suma de ondas de diversas longitudes.

El índice de refracción del material que forma a la fibra varía con la longitud de onda, lo que da por resultado una velocidad de propagación diferente para cada longitud de onda. Si se inyecta luz de diversas longitudes en una dirección dada (modo especificado), esta luz se propaga a diferentes velocidades, según la longitud de onda, y si se descompone en función del tiempo, da como resultado un retardo entre las diferentes longitudes de onda en el extremo de la fibra, aún cuando se hayan inyectado en el mismo instante. A esta dispersión se le llama *dispersión cromática* o *dispersión material*.

III.5. Acoplamiento entre la fuente y la fibra.

La eficiencia del acoplamiento entre una fuente y una fibra depende, simultáneamente, de los parámetros del emisor (superficie, perfil del índice), de las características de la fibra (diámetro del núcleo perfil del índice, apertura numérica) del medio que separa a la fuente de la fibra (índice de refracción distancia fuente fibra). Todos estos parámetros tienen una influencia sobre la transferencia del flujo energético de la fuente hacia la fibra. El acoplamiento debe tener por objetivo lograr que se inyecte el máximo flujo energético al núcleo de la fibra y que pueda propagarse

Uno de los mayores problemas que tienen las comunicaciones por fibra: es el acoplamiento del dispositivo fuente a la fibra. En teoría, las dimensiones de una fuente

de luz para ser infinitamente ajustable ha de ser un punto geométrico, con las implicaciones físicas e incluso filosóficas que los dichosos puntos plantean

Para ajustarnos más a la realidad del emisor de luz ideal debería tener un punto de irradiación con una superficie igual a la del núcleo de la fibra óptica y, además no existir distancia alguna entre la fuente y la superficie de aceptación de la misma

De hecho esto no es posible por varias razones, la más importante de las cuales es que el haz no origina en la superficie del LED o diodo láser, sino en el interior del mismo; por lo tanto, hay una distancia física entre el punto de emisión la fibra. Las emisiones de luz puntuales tienen una característica esférica, es decir, la radiación se proyecta en todas direcciones. En el caso de los diodos LED la radiación emerge en forma de un cono de considerable amplitud, lo cual conlleva que cuando dicho haz alcanza la cara física del dispositivo ocupa una superficie circular mucho mayor que el punto original (figura III.5.1).

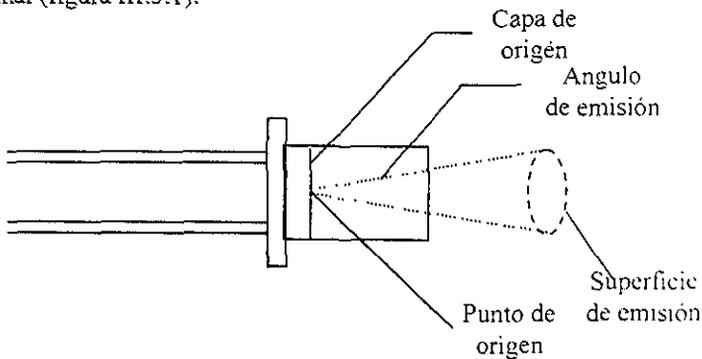


Figura III.5.1.

En el caso de los diodos láser los espejos cavitarios y la naturaleza monocromática de la radiación ayudan a producir un haz más coherente y con menos divergencia; pero no obstante, y debido a lo reducido de el punto de emisión esta divergencia es insoslayable.

Si la longitud de una cavidad es igual a un número entero de semilongitudes de onda, la cavidad resonará a esta frecuencia. Por tanto, de una cavidad larga puede obtenerse un número de frecuencias resonantes y separadas en el espectro una cierta distancia.

Aunque la fibra se instale a la menor distancia posible del punto de emisión se hace imprescindible el uso de lentes de centrado acoplamiento bien sean del tipo cilíndrico o esférico, de forma que el punto de emisión original se forme con la menor superficie posible lo más centrado en el eje de la fibra.

Varios fabricantes de dispositivos optoelectrónicos como los LED o láser semiconductor proporcionan elementos que ya incluyen en su construcción un sistema óptico colimador y de ajuste que permite el acoplamiento semiconductor-fibra con las menores pérdidas posibles, lo cual evita el acoplamiento de ópticas diminutas posteriores de muy difícil manejo fuera del entorno de un laboratorio

Estos dispositivos reciben el nombre genérico de optoadaptadores con tolerancias de fracciones de longitud de onda que coliman la luz láser, con lo que se obtienen haces con un bajísimo nivel de astigmatismo y, por tanto una gran capacidad de inyección.

III.6. Parámetros básicos.

Ancho de banda.

Se define el ancho de banda de una fibra óptica como aquella frecuencia a la cual la magnitud de la función de transferencia decrece hasta una fracción especificada, generalmente 3 dB, con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Las fibras ópticas presentan anchos de banda desde $10 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$, pudiendo llegar hasta los $1 \text{ 500 GHz} \cdot \text{km}$.

Los cables ópticos son capaces de presentar una capacidad de transmisión superior en 500 veces a la capacidad de transmisión de sus homónimos coaxiales.

Ancho de banda óptico.

Se define el ancho de banda de una señal óptica como aquella frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica cae 3 dB ópticos con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Ancho de banda eléctrico.

Se define el ancho de banda de una señal eléctrica como aquella frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica cae 3 dB eléctricos con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Atenuación.

Se puede definir la atenuación como la disminución o pérdida de la potencia lumínica inyectada en la fibra con la distancia.

Con los bajos valores de atenuación que se consiguen actualmente en las fibras ópticas monomodo del orden de 0,2 dB a 0,3 dB, se logra aumentar la distancia entre repetidores llegándose a cubrir tramos de hasta 50 Km, mientras que en los sistemas de cable coaxial la sección repetidora se sitúa cada 1,2 Km.

Dispersión modal.

El fenómeno físico de la dispersión entre modos, se produce porque la velocidad de propagación del haz lumínico por el núcleo de la fibra óptica no permanece constante.

Inmunidad Electromagnética.

La fibra óptica está constituida con materiales dieléctricos, y por tanto no se ve afectada por los campos electromagnéticos.

Es inmune a la radiación electromagnética recibida. No constituye fuente de radiación electromagnética al no emitir radiación alguna, por lo que se convierte en el medio ideal de transporte cuando nos encontramos en medios con fuertes campos electromagnéticos tales como líneas de transporte de energía de alta tensión.

Reducción de tamaño.

La utilización de fibras ópticas conlleva una notable reducción del tamaño de los cables, comparativamente hablando, con respecto a capacidades de transporte equivalentes.

CAPITULO IV. EMISORES OPTICOS.

En este apartado veremos las características de los emisores de luz coherente constituidos por los láseres y los emisores de luz incoherente constituidos por diodos

IV.1 Coherentes.

La primera fuente coherente de luz se inventó a principios de la década de 1960 Esta fue el láser; el invento tuvo el mérito de revivir la idea de utilizar la luz para transportar información.

Láser de inyección.

Los láseres semiconductores son parecidos a otros láseres; son emisores de radiación coherente, es decir monocromática (longitud espectral muy pequeña) y muy directiva. Las transiciones electrónicas correspondientes son transiciones entre las bandas de un material semiconductor. En los láseres de inyección, el efecto láser se produce por el paso de una corriente eléctrica. La palabra láser significa: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Hay por lo tanto amplificación por emisión estimulada de luz.

Emisión estimulada.

Se revisara cuales son las transiciones electrónicas entre dos niveles de energía de un átomo.

Absorción.

Considérense dos niveles de energía E_1 y E_2 de un átomo.

El nivel E_1 es el nivel fundamental; un electrón situado en ese nivel está en su estado fundamental o normal. El nivel E_2 , con energía superior a E_1 , no está ocupado por un electrón. Si un fotón tiene energía superior o igual a $E_2 - E_1$, cede esta energía al electrón que pasa al nivel E_2 el fotón desaparece. Fue absorbido. El átomo se encuentra entonces en un estado excitado.

Emisión espontánea.

Un átomo excitado está en un estado normal o inestable. Este átomo tenderá a volver a su estado fundamental, regresando al nivel E_1 que libera, en forma de luz, la energía $E_2 - E_1$.

Es el fenómeno de emisión espontánea.

Emisión estimulada.

Si un fotón de energía $E_2 - E_1$ llega mientras el átomo está excitado, provoca instantáneamente el regreso del electrón hacia el nivel E_1 y la emisión de un nuevo fotón. El fotón emitido se encuentra en fase con el fotón que provocó la transición. Es el fenómeno de emisión estimulada.

Los dos elementos utilizados comúnmente para ejecutar las tareas de emisión son los diodos electroluminiscentes tipo LED ELED y los diodos láser (LD). Tanto unos como otros tienen estructuras similares siendo su principal diferencia la existencia de una cavidad resonante en los láseres denominada Fabry-Perot. En ambos dispositivos la emisión de luz se origina por la recombinación radioactiva del par electrón/hueco, donde el hueco constituye un estado libre de la banda de valencia del semiconductor y se efectúa la transición cuando un electrón se transfiere de la banda conductora a la de valencia, atravesando la banda prohibida o intermedia con un nivel de energía diferente.

Diodos láser.

Aunque existe en la actualidad gran variedad de emisores láser que trabajan en la frecuencia de los 850 nm, la dirección a la que se encaminan la investigación y desarrollo actuales es hacia las longitudes de 1300 y 1500 nm, puesto que las pérdidas son considerablemente más bajas y éste es un criterio de diseño esencial. Los mejores son aquellos con una composición de semiconductores en los grupos III-IV, InP/GaInAsP

Aunque el proceso de emisión de luz es similar a la de un diodo de emisión lateral, las principales diferencias radican en la arquitectura de la cavidad Fabry-Perot en la altísima concentración de portadores inyectables. De este modo se obtiene un espectro estrecho, con alta ganancia óptica, que da lugar a un haz coherente, teniendo su origen la emisión de fotones mediante la recombinación directa electrón hueco en la capa activa.

En el plano vertical, el confinamiento óptico de los portadores se obtiene mediante el recubrimiento de la capa activa por capas pasivas de tipo P y N. Al poseer un intervalo entre bandas, superior al de la capa activa, se forma de este modo un pozo de potencial que impide el escape por difusión de portadores inyectados.

Dado que la pastilla láser (de unos 300 micro-metros) posee dos caras talladas en forma de espejos y que las capas pasivas tienen un índice de refracción inferior al de la capa activa, se forma una guía de ondas ópticas que confina la luz al propagarse entre los espejos al plano de la capa activa. Debido a la arquitectura de esta estructura, la corriente en los laterales de la zona activa es muy pequeña.

En la región de emisión espontánea el espectro del láser es parecido al de un LED; sin embargo, a partir de una cierta densidad de corriente en la zona activa la ganancia óptica supera las pérdidas con lo que la emisión pasa de espontánea a estimulada. Este nivel de corriente al que se produce el cambio se denomina Umbral que en los láseres de heteroestructura es de orden de 50 a 200 mA

Aunque este tipo de láseres puede acoplarse a una fibra por simple contacto, la unión tiende a ser tan fina que imparte una actitud divergente al haz, por lo que dicha unión tiende a efectuarse mediante la interpolación de una lente cilíndrica que corrige el haz entre fibra y láser.

Aunque el comportamiento de los láseres es muy superior al de los LED, estos presentan las ventajas de fiabilidad y costo, a parte de los saltos de frecuencia comunes en los láseres comerciales.

El desarrollo de los láseres de realimentación distribuida (DFB) apunta a solucionar este problema.

Este nuevo tipo de láser, puesto a punto por Thompson en colaboración con la CNTB Francesa, funciona alrededor de los 1500nm caracterizándose por una amplitud espectral reducida que evita distorsiones en su propagación a lo largo de la fibra. Mediante una perfecta distribución de capas cristalinas modificando la cavidad Fabry-Perot permite limitar la lasación, o sea la amplificación estimulada de la luz a una sola raya espectral seleccionando solamente una raya de resonancia en la cavidad produciendo un haz láser de extraordinaria pureza.

La potencia óptica de estos dispositivos de hasta 10 mV y el rendimiento de conversión (relación entre potencia eléctrica aplicada al diodo y la emisión del mismo) es comparable a los más elevados rendimientos de los láseres de potencia actualmente en uso.

Otros tipos de láser como los denominados C3 (CCC o Cleaved-Coupled-Cavity) consistente, como su nombre indica, en el acoplamiento óptico de dos cavidades de semiconductor, el láser tipo Yag de Neodimio, Itrio, Aluminio y los láseres pulsantes para la excitación de fibras dopadas con Erblio son algunos de los dispositivos sobre los

que existen mejores perspectivas y sobre los que se vierte el mayor peso de la investigación actual.

IV.2. No coherentes.

Se utilizan dos tipos de diodos emisores de luz; los de emisión de superficie y los de emisión de borde, con componentes que varían según la frecuencia de emisión: Galio, Aluminio y Arsénico para 850 nm y mediante la adición de Fósforo e Indio para 1.300 y 1.500 nm.

La diferencia principal entre estos diodos estriba en el sistema de emisión de luz. Mientras que en los de emisión de superficie de luz se emite perpendicularmente al plano de la unión a través de la superficie, una gran parte de la radiación queda absorbida por el sustrato y la emisión es de ángulo grande.

En los LED de emisión de borde (ELED) la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es mucho menor. Los ELED conservan la misma geometría y diseño que los láseres de franja, aunque modificados para evitar lasación. Tienen como ventaja sobre los LED convencionales bajo ruido, potencias de salida considerables y velocidades de modulación muy elevadas, que los hacen superiores en alcance y ancho de banda a los emisores de superficie.

Un tipo de ELED, el de GaAs/GaAlAs, trabaja en el rango de los 850 nm con potencias de salida de 300 μ W, con corriente de excitación de 100 mA y velocidades de 70 Mb/seg

Los LED tienen unas características de extrema linealidad que, aunque no constituyen un parámetro crítico, les hace más idóneos para la transmisión digital, donde el ancho de banda reviste gran importancia ya que la velocidad máxima de transmisión está íntimamente relacionada con ésta.

Otras ventajas de los LED son costos más económicos que los láser, ruido modal más reducido y una mayor facilidad de uso, dado que el circuito es extremadamente sencillo sin estabilizadores de potencia característico del láser.

En los LED la fuente luminosa la constituye un plano circular del orden de $20\ \mu\text{m}$ lo cual puede dar una idea de la precisión requerida para efectuar la unión entre LED y fibra. Esta se realiza mediante el perfecto alineamiento de emisor-fibra y su acoplamiento mediante fusión o adhesivo.

Teniendo en cuenta los problemas inherentes a esta unión y las pérdidas que puede ocasionar, es cada vez más común el que los fabricantes suministren los diodos con un tramo de fibra ya perfectamente fusionado y alineado, dado que el empalme fibra-fibra es de más fácil ejecución, con medios técnicos menos sofisticados y menores pérdidas

IV.3. Modulación.

Modulación del pulso lumínico.

Las dos técnicas que se utilizan para modular el pulso lumínico emitido por la fuente de luz son las siguientes:

- Modulación directa de intensidad lumínica o modulación analógica del pulso lumínico.
- Modulación previa en frecuencia o modulación digital del pulso lumínico.

Modulación Directa de Intensidad Lumínica.

En este tipo de modulación, la potencia lumínica de la fuente óptica es proporcional a la variación en el tiempo de la señal eléctrica.

La señal eléctrica es la que modula directamente la intensidad lumínica de la fuente óptica

En la técnica de modulación de intensidad lumínica se realiza una modulación lineal de la señal eléctrica presente en la entrada del modulador en la que se verifica que la evolución temporal de la potencia lumínica presente a la salida del modulador de la fuente óptica es directamente proporcional a la evolución temporal o traza la señal eléctrica.

Este tipo de modulación recibe también el nombre de modulación analógica y se utiliza puntualmente para la transmisión de señales digitales sencillas en distancias cortas sin necesidad de regeneraciones intermedias.

La figura IV.3.1 representa la señal eléctrica moduladora presente en la entrada del transmisor, mientras que la figura IV.3.2 representa su homónima modulada directamente presente en la salida del modulador de intensidad lumínica.

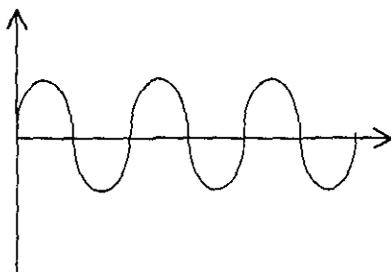


Figura IV.3.1. Señal eléctrica.

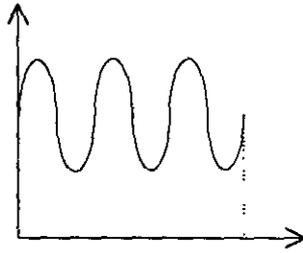


Figura IV.3.2. Potencia lumínica en transmisión.

Modulación Previa en frecuencia.

Esta modulación difiere de la anterior en que, con antelación a la modulación directa de intensidad lumínica, se realiza una modulación eléctrica mediante una subportadora para que con la señal resultante se module directamente la intensidad lumínica de la fuente óptica.

La modulación eléctrica previa a la modulación de intensidad lumínica habitualmente se realiza con una subportadora modulada en frecuencia, por lo que esta señal modulada en frecuencia la que actúa sobre el modulador de la fuente óptica.

Este proceso difiere del anterior en que la señal eléctrica presente es modulada inicialmente en frecuencia para, a continuación, ser modulada en intensidad lumínica

Mediante el proceso previo de modulación en frecuencia con una subportadora se logra mejorar la relación señal/ruido obviar los posibles problemas inherentes a la falta de linealidad de los detectores ópticos, al encontrarse la información en las señales moduladas en frecuencia contenida en las transiciones por cero de la señal.

Este tipo de modulación recibe el nombre de modulación digital y se utiliza para la transmisión de señales digitales en largas distancias dadas las ventajas que presenta

frente al proceso anterior consistentes en una mejor relación señal/ruido en su inmunidad frente a la falta de linealidad en recepción de los convertidores electro-ópticos al extraerse la información, en el proceso de desmodulación en frecuencia, en los cruces por cero de la señal.

Las figuras IV.3.3, IV.3.4 y IV.3.5 representan los pasos sucesivos que se siguen en el proceso de modulación digital de una señal óptica.

La figura IV.3.3 representa la señal eléctrica digital presente a la entrada del transmisor óptico.

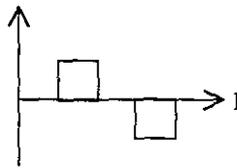


Figura IV.3.3.

La figura IV.3.4 representa la subportadora, en este caso con una frecuencia de modulación de 20 MHz, que se utiliza para modular previamente en frecuencia la señal eléctrica digital presente a la entrada del transmisor óptico.

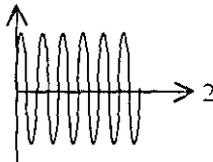


Figura IV.3.4.

La figura IV.3.5 representa la señal eléctrica digital una vez sometida al proceso de modulación en frecuencia en el que se han adoptado los siguientes valores de la

frecuencia de modulación para cada uno de los niveles de la señal eléctrica digital presente, inicialmente, en la entrada del transmisor óptico:

- 20 MHz para el nivel "0"
- 30 MHz para el nivel "+1"
- 10 MHz para el nivel "-1"

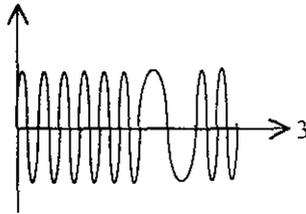


Figura IV.3.5

La figura IV.3.6 representa el pulso lumínico modulado digitalmente presenta a la salida del modulador de intensidad lumínica que representa la variación de la potencia lumínica insertada por el transmisor en la fibra óptica.

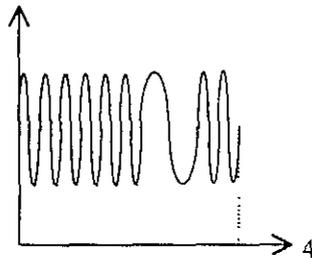


Figura IV.3.6

CAPITULO V. DETECTORES OPTICOS.

Los fotodetectores son un componente crítico en cualquier sistema de comunicaciones por fibra. Dada la potencia de que disponemos a la salida emisora de una fibra, es esencial que el fotodetector sea de una extrema sensibilidad.

Si dicha potencia es mínima se debe en primer lugar a que la potencia inyectada por un LED o láser es pequeña. A ésta hemos de añadir las siguientes pérdidas del sistema:

- a) Pérdidas en el acoplamiento emisor-fibra.
- b) Pérdidas de inyección por las limitaciones del cono de aceptación.
- c) Pérdidas por reflexión en la frontera aire-fibra o lente fibra.
- d) Pérdidas por absorción y dispersión en el interior de la propia fibra.
- e) Pérdidas por reflexión en la frontera fibra-aire o fibra-lente en el extremo emisor de la fibra.
- f) Pérdidas por acoplamiento con el fotodetector.

Debe sumarse a esta lista de pérdidas la degradación de la señal debido a la demodulación y a los ruidos introducidos por las etapas de amplificación o repetición en el caso de líneas de larga distancia, como es el caso de los tendidos transatlánticos.

Así mismo, hay que tener en cuenta otros problemas de geometría de las propias fibras, alteraciones en los índices de refracción y otros factores que contribuyen a las pérdidas, el detrimento de la señal o ambos.

Es paradójico que la carrera por mejorar las características de los sistemas optoelectrónicos se haya concentrado en los transmisores, especialmente los de láser y en las propias fibras ópticas, cuando la simple sustitución de un detector óptico por otro puede incrementar la capacidad de un sistema óptico enormemente sin tocar ningún otro

componente. Para remediar este curioso estado de cosas, un cierto número de grupos de investigación dedican sus esfuerzos actualmente a la mejora de los fotodetectores

Básicamente, el fotodetector es un dispositivo que transforma fotones en electrones, dependiendo de su estructura las características, virtudes y defectos del mismo. Existen varios tipos de fotodetectores, cada uno de ellos con un compromiso basado en la física de su funcionamiento.

Los elementos más importantes a determinar son anchura de banda, ganancia, ruido y velocidad de trabajo. En la actualidad se trabaja principalmente con dos tipos de fotodetectores: el fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha (APD), este último con la capacidad de dar una ganancia a la detección.

V.1. Principio de funcionamiento del fotodiodo.

Absorción óptica.

El detector debe transformar la señal óptica (fotones) en señal eléctrica (electrones). Esta conversión es posible gracias a la propiedad de absorción óptica que posee el semiconductor.

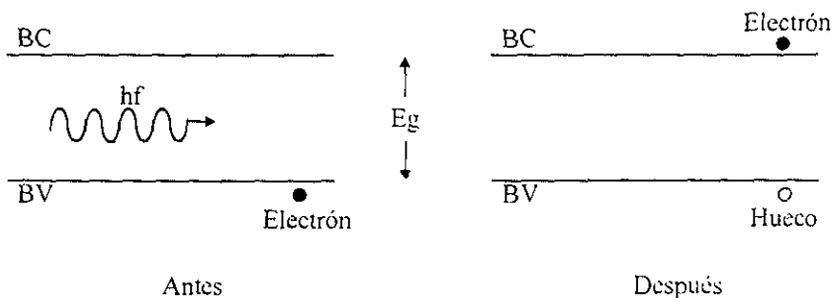


Figura V.1.1. Absorción de un fotón de energía hf por un semiconductor de banda de energía E_g .

Cuando la luz penetra en un semiconductor, puede absorberse si la energía de los fotones incidentes es suficiente para que los electrones suban de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) (figura V.1.1). Es el fenómeno de absorción intrínseca; la absorción del fotón produce un electrón en la banda de conducción y un hueco en la banda de valencia, y se tiene la creación de un *par electrón-hueco* por cada fotón absorbido; si se llega a recuperar el electrón en un circuito exterior, hay producción de corriente eléctrica. La probabilidad de que un fotón llegue a generar un par electrón-hueco depende de la estructura de banda del semiconductor. Esta probabilidad es mayor en el caso de un semiconductor de transición directa de banda que en el de un semiconductor de transición indirecta de banda. La probabilidad de absorción puede cuantificarse con ayuda del coeficiente de absorción α , que es el mismo coeficiente para la absorción intrínseca del material de una fibra óptica. Si se tiene un flujo energético P_0 que llega a la superficie de un semiconductor, el flujo $p(x)$ a una distancia x de la superficie es dado por.

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x}$$

El coeficiente de absorción α depende del semiconductor escogido y de la longitud de onda λ de la luz. En efecto, para que haya absorción es necesario que tenga $\lambda < \lambda_c$, donde λ_c es la longitud de onda crítica y está definida por:

$$hf = h \frac{c}{\lambda_c} = E_g$$

En esta fórmula E_g es la amplitud de la banda prohibida del semiconductor. Así para cada semiconductor se tiene una longitud de onda crítica específica.

Puesto que en el área de las fibras ópticas, las longitudes de ondas utilizadas se encuentran entre 0.8 y 0.9 μm o entre 1.1 y 1.6 μm , es primordial escoger semiconductores con propiedades absorbentes a esas longitudes de onda.

La absorción se realiza así sobre una distancia L inversamente proporcional al coeficiente de absorción α . Como α varía con λ , L es también función de la longitud de onda

Para el silicio, $\alpha(\lambda)$ varía alrededor de 500 a 1000 cm^{-1} para una longitud de onda entre 0.8 y 0.9 μm . Resulta que 90% de la luz a estas longitudes de onda, es absorbida hasta una profundidad de 25 a 50 μm . El cristal de silicio debe entonces tener un espesor de 50 μm por lo menos.

Entre mayor sea $\alpha(\lambda)$, se absorberá una mayor cantidad de fotones cerca de la superficie de entrada.

Recuperación de portadores estructurales p - n .

Una vez formado el par electrón-hueco, es necesario recuperar las cargas eléctricas para obtener una corriente eléctrica; con el fin de evitar que los electrones se recombinen con los huecos, se les separa con la ayuda de un campo eléctrico, en cuya presencia, los electrones negativos y los huecos positivos están sometidos a fuerzas eléctricas iguales pero de sentidos opuestos. El campo eléctrico se produce utilizando la barrera de potencial de una unión p - n polarizada inversamente. Se construye así un diodo y al detector se le llama fotodiodo. Cuando un par electrón-hueco se forma en la región de transición entre las regiones p y n , el campo eléctrico existente empuja al electrón hacia la región n y al hueco hacia la p . Como las regiones p y n se encuentran respectivamente despobladas de electrones y huecos, no puede haber recombinación y estas cargas, así recuperadas, dan lugar a una corriente en el circuito exterior de polarización inversa del diodo.

CAPITULO VI.
TRANSMISION DE DATOS POR FIBRA OPTICA

**ESTA TERCERA PARTE DEBE
SALIR EN LA BIBLIOTECA**

CAPITULO VI. TRANSMISION DE DATOS POR FIBRA OPTICA.

En este apartado hablaremos de como se lleva a cabo la transmisión de los datos a través de la fibra óptica, como se ha visto antes. un sistema de comunicación por fibra optica está constituido por tres elementos: el módulo de emisión. un canal de transmisión (fibra óptica) y un módulo de recepción. Es aquí donde se verá como es necesario hacer la multicanalización para llevar más información a través de una fibra óptica así como es necesario poner regeneradores en nuestro canal de transmisión. además de codificar las señales para obtener una correcta transmisión.

VI.1. Técnicas de multicanalización.

Transmisión de varias señales (multicanalización).

Quizá sea importante transmitir al mismo tiempo varias señales $e(t)$; a esto se le llama multiplex o multicanalización. Evidentemente, se podría utilizar un sistema de transmisión para cada señal; sin embargo, esta solución tal vez no sea barata, por lo que es preferible tratar de transmitir los diversos mensajes por el mismo canal de transmisión en este caso, la misma fibra óptica).

En la transmisión óptica, no es posible por el momento modular la frecuencia de la luz que sirve como portadora, sólo se puede modular su amplitud (el flujo energético).

Multicanalización por división de frecuencia (FDM).

La multicanalización por división de frecuencia (FDM en inglés) es una técnica utilizada para transmitir al mismo tiempo, sobre un mismo canal, varias señales analógicas. Si $e_n(t)$, son n señales analógicas para transmitir, con un ancho de banda B , entonces el índice $n(n > 1)$ permite distinguirlas. Cada señal $e_n(t)$ modula (en amplitud o en frecuencia) a una señal de frecuencia f_n .

Todas estas señales moduladas, con frecuencias diferentes modulan a su vez una portadora maestra a muy alta frecuencia F . La subportadora maestra, puede modularse en amplitud o en frecuencia. Por último, la subportadora maestra modula la amplitud del flujo energético inyectado a la fibra (véase la figura VI 1.1).

Supóngase que las señales $e_n(t)$ sean conversaciones telefónicas ($B = 4$ kHz). Las frecuencias f_n son por lo tanto $4, 8, \dots, n \times 4$ kHz. La frecuencia F de la subportadora maestra es igual a: $n \times 4$ kHz. Así una subportadora maestra a 2540 kHz puede transmitir 635 conversaciones telefónicas. La demodulación se efectúa mediante filtrado, con el fin de separar las 635 conversaciones telefónicas.

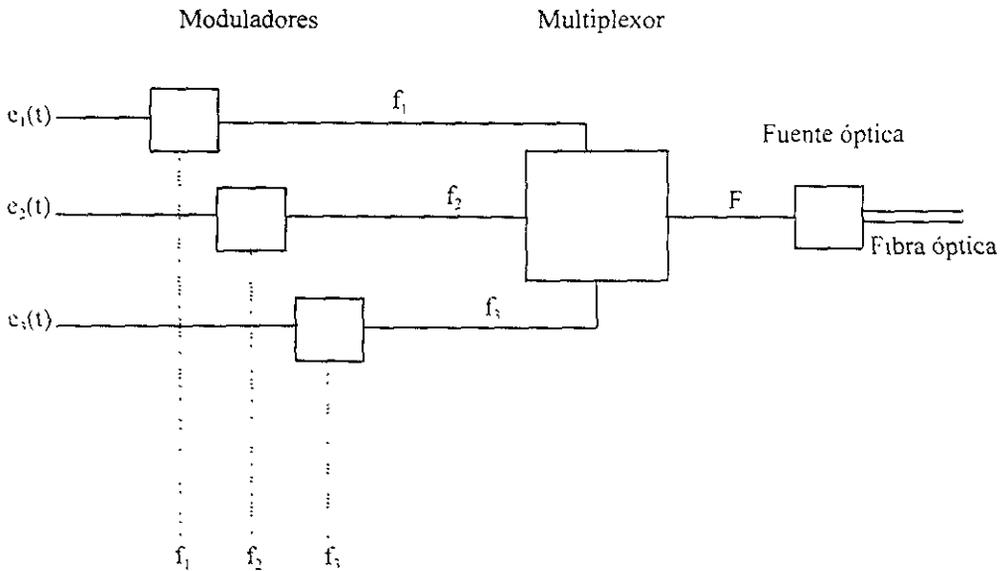


Figura VI.1.1. Multicanalización por división de frecuencia (FDM)

Multicanalización por división de tiempo (TDM).

La multicanalización por división de tiempo (TDM) en inglés) es una técnica que permite transmitir por un mismo canal muchas señales digitales. Tómese como ejemplo un sistema PCM de 8 bits. La señal por transmitir es una señal telefónica ($B = 4 \text{ kHz}$). la frecuencia de muestreo es de $2B$, lo que corresponde a un muestreo cada 125 micro seg. Si cada bit dura 1 micro seg., entonces la transmisión de una muestra toma 8 microseg. por lo que antes de la transmisión de otra muestra de esta señal, hay un tiempo de 117 microseg., durante el cual el canal de transmisión no se utiliza. Este tiempo libre permita transmitir muestras de otras 14 señales telefónicas diferentes. Este es el principio de la multicanalización por división de tiempo. En la telefonía hay un formato normalizado llamado formato T1, con el cual se transmiten 193 bits durante los 125 microseg., esto corresponde a 24 señales PCM codificadas con 8 bits.

Se transmite un bit suplementario después de la vigésimo cuarta muestra, para controlar la sincronización de transmisión.

La multicanalización por división de tiempo puede también utilizarse con modulación de pulsos (PAM, PDM o PPM). Los pulsos modulados de las diversas señales por transmitir se intercalan en un espacio temporal libre entre dos muestras sucesivas, por lo que es necesario hacer que la modulación de una sola señal no ocupe todo el espacio.

La multicanalización se realiza con un multiplexor que transmite en serie, sobre la línea de transmisión los 8 bits del canal 1, después los 8 bits del canal 2 y así sucesivamente. Después de que se transmitió el canal vigésimo de una nueva muestra de canal 1. Al extremo receptor, un demultiplexor realiza la operación inversa, es decir que envía los 8 bits de cada canal hacia una línea diferente donde se decodificarán.

Los sistemas de multicanalización antes descritos no son exclusivos para las telecomunicaciones por fibra óptica, la única limitación que presenta la fibra óptica, es que la luz solo puede modularse en amplitud. La señal eléctrica que resulta de las operaciones de modulación o de multicanalización modula en amplitud al flujo energético emitido por una fuente óptica.

Multicanalización por división de longitudes de onda (WDM).

Esta multicanalización es específica para las telecomunicaciones ópticas. Se utiliza la propiedad que posee la fibra óptica de presentar baja atenuación a varias longitudes de onda. Entonces se puede inyectar luz a una fibra en diversas longitudes de onda. Se utilizan varias fuentes ópticas cada una de las cuales emite una longitud de onda particular. La luz emitida por cada fuente se modula mediante una señal eléctrica diferente y los diferentes flujos luminosos emitidos se introducen en una sola fibra. En el otro extremo de la fibra, la luz se filtra en sus diferentes longitudes de onda cada flujo energético, para cada longitud de onda específica, se transforma en una señal eléctrica, gracias a un detector.

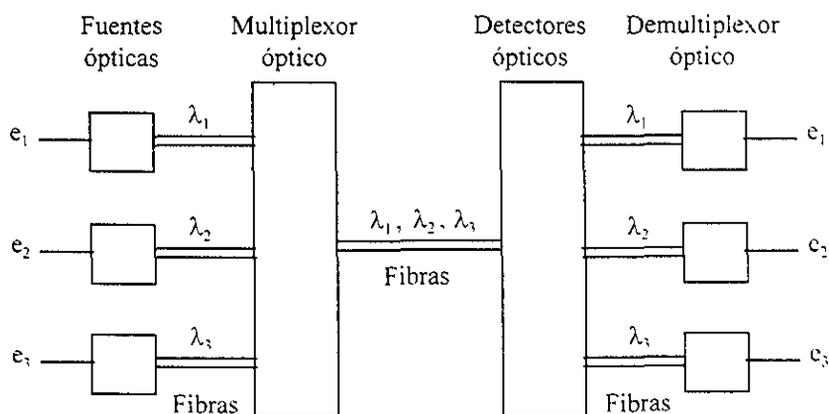


Figura VI.1.2. Multicanalización por división de longitudes de onda.

Se pueden así transmitir varias señales diferentes sobre una sola fibra. Un sistema de emisión multicanal por división de longitudes de onda comprende (véase la figura VI.1.2).

- Fuentes emisoras en longitudes de onda diferentes
- Un multiplexor óptico que permite acoplar luces emitidas en una fibra.
- Una fibra de pequeña atenuación a las longitudes de onda por transmitir
- Un demultiplexor óptico para separar la luz que llega, en sus diferentes longitudes de onda
- Detectores ópticos para convertir luz en señales eléctricas

VI.2. Técnicas de regeneración de señales.

Regeneradores ópticos.

Los regeneradores ópticos constituyen uno de los elementos fundamentales en las redes de comunicaciones ópticas al realizar la amplificación y regeneración de la señal óptica presente en su entrada, presentando siempre en su salida una señal óptica.

Independientemente de que el enlace sea unidireccional o bidireccional, son elementos unidireccionales y se ubican siempre entre cabecera y final de línea.

Los generadores ópticos, al igual que todos los equipos que se utilizan en las comunicaciones ópticas, sistemas de transmisión óptica o equipos de línea ópticos, se caracterizan, de forma análoga a sus homónimos eléctricos, basándose en parámetros eléctricos y no dependen, por lo tanto, de parámetros óptico alguno.

Uno de los parámetros característicos de los regeneradores ópticos (determinante en los enlaces ópticos) lo constituye la sección de regeneración del enlace, y representa el

alcance máximo o distancia máxima que es posible cubrir con un transistor y un receptor óptico sin regenerar la señal.

La sección de regeneración del enlace depende del nivel de la potencia óptica presente en la salida del transmisor óptico y del margen dinámico del receptor óptico.

El caso de que la distancia que hay que cubrir en el enlace fuese mayor que la sección de regeneración del enlace, sería necesaria la utilización de regeneradores ópticos, que se encargarían de realizar la amplificación y regeneración de la señal óptica.

La sección de regeneración del enlace depende de diversos factores, como son:

- Características de la fibra óptica.
- Características de los equipos de línea.
- Características de las señales por transmitir.

Otros elementos integrantes de los equipos de línea que se utilizan en las comunicaciones ópticas son los equipos de supervisión y control de los fallos o errores producidos en la transmisión, y los equipos de protección y desconexión automática en caso de interruptores de la fibra óptica, de obligatoria utilización en los transmisores ópticos implementados con diodo láser.

En función de la técnica empleada para la amplificación y regeneración de la señal óptica, es posible distinguir dos tipos de regeneradores ópticos: Regeneradores ópticos convencionales y regeneradores ópticos de fibra activa.

Regeneradores ópticos convencionales.

Los regeneradores ópticos convencionales, realizan una doble y simultánea conversión, opto-eléctrica y electro-óptica, de la señal presente en su entrada o en sus entradas, por lo que la señal en su salida o en sus salidas es siempre óptica.

El equipo está conformado por un receptor óptico seguido de un amplificador y de un transmisor óptico, por lo que sus componentes fundamentales son el conversor opto-eléctrico, el amplificador de línea y el conversor electro-óptico.

Las señales presentes en la entrada de los transmisores ópticos, y en la salida de los receptores ópticos son siempre señales eléctricas que se convierten en señales ópticas para permitir su propagación por la fibra óptica.

En un primer paso, se realiza la conversión opto-eléctrica de la señal para, seguidamente realizar, tras un proceso de regeneración y amplificación, la segunda conversión eléctrico-óptica, de la señal.

Los valores habituales de las secciones de regeneración, en regeneradores ópticos convencionales equipados con diodos láser, con fibras ópticas monomodo optimizadas para trabajar a una longitud de onda de 1310 nm, son del orden de 45 kilómetros.

Regeneradores ópticos de fibra activa.

Los regeneradores ópticos de fibra activa son los únicos capaces de presentar en su salida una señal óptica tras realizar la conversión óptica-óptica de la señal presente en su entrada.

Se trata por tanto del único tipo de regenerador en el que realiza la "amplificación y regeneración óptica" de la señal en el más estricto sentido del término

Este tipo de regenerador se basa en el empleo de la tecnología de la fibra activa, que se implementa mediante la inclusión de un tramo de fibra óptica dopada con Erblio en donde se produce la conversión de la energía lumínica, aportada por una fuente a diodo láser externa, en energía lumínica de las mismas características que la señal óptica de

entrada. Se logra obtener, así, una señal óptica de salida con mayor potencia lumínica e idénticos valores de longitud de onda y fase que la señal óptica presente en la entrada.

La utilización de las fibras ópticas dopadas con Erblio en los regeneradores ópticos, se basa en la propiedad que presentan los iones de Erblio de absorber los fotones bombeados por la fuente láser externa, lo que provoca la elevación de la banda de energía de sus electrones con respecto al nivel que los mismos presentarían cuando la fuente láser se encuentra en estado de reposo.

Desde este nuevo nivel, los electrones descienden a un nuevo estado que recibe la denominación de metaestable.

Una vez llegados a este punto, la incidencia de un fotón de señal en el tramo de fibra óptica dopada con Erblio obliga a un electrón, en estado metaestable, a retornar a su nivel de reposo, liberando su energía en forma de un fotón estimulado de idéntica longitud y fase que el fotón de señal incidente.

La repetición de este proceso de forma sucesiva a lo largo de tramo de fibra óptica dopada con Erblio, provoca la amplificación óptica de la señal incidente en el mismo.

Los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio, son elementos ópticos activos unidireccionales que realizan la amplificación del nivel de la señal óptica presente en su entrada de forma directa y sin pasos intermedios de las conversiones opto-eléctrica y electro-óptica.

La figura VI.2.1. representa el diagrama de bloques característico de un amplificador óptico realizado de acuerdo con la tecnología de la fibra activa.

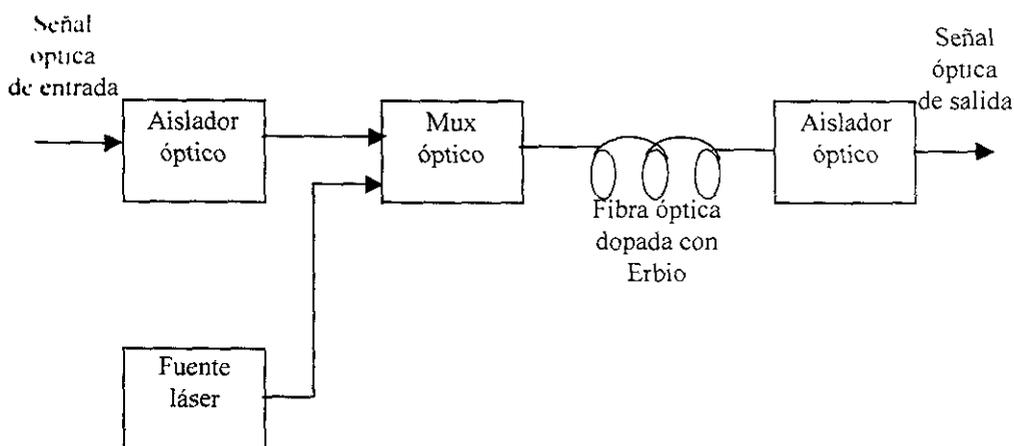


Figura VI.2.1. Amplificador óptico.

La señal óptica de entrada incide en un aislador óptico que permite únicamente propagarse al haz lumínico en el sentido de propagación y que lo guía hacia uno de los dos puertos de entrada del multiplexor óptico.

En el puerto de entrada restante del multiplexor óptico se inserta el haz lumínico bombeado por una fuente de luz a diodo láser.

En el haz lumínico presente en el puerto de salida del multiplexor óptico se encuentra acoladas de forma simultánea la señal óptica de entrada y el pulso lumínico bombeado por el diodo láser.

Seguidamente, el pulso lumínico multiplexado en longitud de onda se inserta en el tramo de fibra óptica dopada con Erbio, donde se produce la amplificación óptica de la señal, con lo que se logra obtener en el puerto de salida una señal con mayor potencia óptica que la de entrada e idénticos valores de longitud de onda y fase que ésta.

El último paso consiste en obligar a la señal óptica de entrada, amplificada ópticamente, a incidir en un nuevo aislador óptico que, de nuevo, permite únicamente propagarse al haz lumínico en el sentido de propagación estipulado. encontrándose, en este punto, la señal óptica amplificada ópticamente en el puerto de salida del amplificador óptico.

En el caso de los amplificadores ópticos comerciales basados en esta técnica (fabricados por la firma PIRELLI CABLE CORPORATION), para enlaces en los que se utilizan fibras ópticas monomodo, conforme la recomendación G-653 del C.C.I.T.T., con valores de longitud de onda de trabajo del diodo láser está prefijada en 980 nm.

Los valores habituales de las secciones de regeneración que se alcanzan con estos equipos son del orden de 110 Km, en redes ópticas implementadas con fibras ópticas monomodo optimizadas para trabajar a una longitud de onda de 1.550 nm, en las que el valor de atenuación característica que las mismas presentan es del orden de 0.23 dB.

Sección de regeneración.

Uno de los parámetros que se ha de tener en cuenta de una forma directa durante la planificación de un enlace de fibra óptica es la sección de regeneración del mismo.

Se entiende por sección de regeneración de un enlace de fibra óptica la sección de repetición del mismo o el máximo valor de la longitud del tramo de fibra óptica entre dos regeneradores consecutivos.

Las secciones de regeneración en las redes de fibra óptica son mayores que en sus homónimas de cables coaxiales, lo que se traduce en una mayor rentabilidad de las primeras frente a las de cobre.

Los factores que determinan las sección de regeneración de un enlace de fibra óptica son los siguientes:

- Factores inherentes a la propia fibra óptica.

Dependiendo del comportamiento de la fibra óptica utilizada en el enlace, monomodo o multimodo, y de los parámetros fundamentales de transmisión que presenta la fibra óptica adoptada una vez conformado cada tramo del enlace: respectivamente atenuación y dispersión cromática o atenuación y ancho de banda

- Factores intrínsecos al equipo de línea.

Dependientes de las características técnicas de los equipos de línea utilizados tales como: fuente de luz utilizada, potencia lumínica emitida, longitud de onda de trabajo o ventana, anchura espectral del haz lumínico, sensibilidad del receptor y ancho de banda requerido por el equipo.

- Factores inherentes al tipo de señal por transmitir.

Estos son: velocidad de transmisión de la señal. código de línea utilizado para codificación de la señal, tasa de error de bit prefijada B.E.R. y el ancho de banda requerido por la señal.

VI.3. Técnicas de codificación de línea.

Los códigos de línea que se utilizan durante el proceso de codificación de las señales ópticas, previamente a la propagación de las mismas a través de las fibras ópticas, son los siguientes:

Código N.R.Z. Unipolar.

El código N.R.Z. Unipolar se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: desde cero hasta + V desde - V, hasta cero.

La codificación de la señal se realiza en base a hacer corresponder al "cero" de la señal digital el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T .

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en hacerle corresponder el valor de amplitud uno de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T .

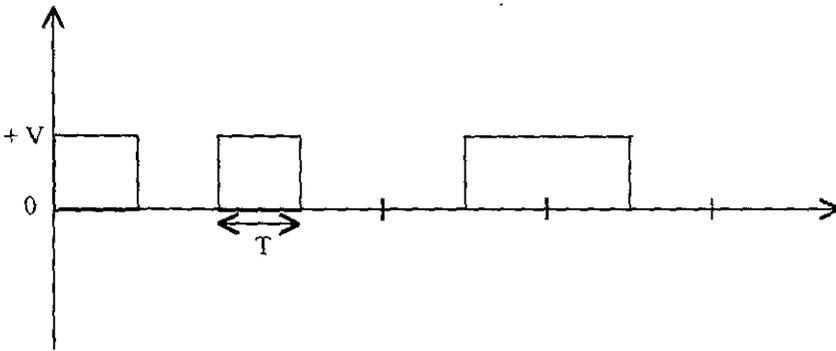


Figura VI.3.1. Código N.R.Z. Unipolar.

La figura VI.3.1 representa la información binaria de la señal digital : 1,0,1,0,0,1,1,0, codificada en base a un código N.R.Z. Unipolar en el que + V cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponden con el tiempo de bit de la señal digital y con el tiempo de bit o tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

Código N.R.Z. Polar.

El código N.R.Z. Polar se caracteriza porque la señal se define entre tres valores característicos.

Dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta +V, y desde - V hasta cero: por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital, el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas al proceso de codificación mediante impulsos positivos negativos.

Inicialmente al primer "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T se le asigna el nivel $+V$ con un duración T .

A continuación se realiza la inversión en el proceso de codificación de la señal con lo que se adopta el criterio de codificación que se utilizo para el primer "uno".

Todo el proceso se repite sucesivamente de forma cíclica, para la codificación de todos los "unos" de la señal digital.

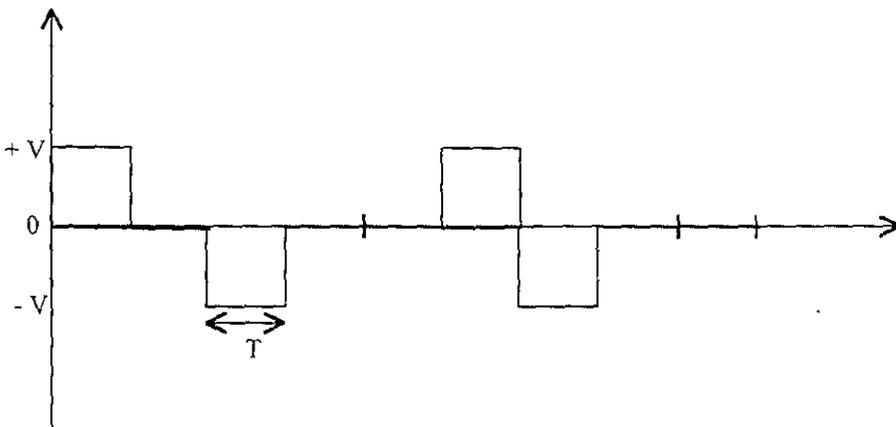


Figura VI.3.2. Código N.R.Z. Polar.

La figura VI.3.2 representa la información binaria de la señal digital: 1.0.1.0.0.1.1.0, codificada en base a un código N.R.Z. Polar en el que $+V$, $-V$ cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde en el tiempo de bit de la señal digital con el tiempo de bit o tiempo del nivel de modulación de la señal codificada

Código R.Z. Unipolar.

El código R.Z. Unipolar se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta $+V$, y desde $-V$ hasta cero.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital con un tiempo de bit T dos niveles consecutivos de amplitud cero de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de $T/2$.

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T consiste en asignar dos niveles consecutivos de amplitudes uno y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

La figura VI.3.3 representa la información binaria de la señal digital 1.0.1.0.0.1.1.0, codificada en base a un código R.Z. Unipolar en el que $+V$ y cero son los valores de amplitud de la señal codificada T corresponde con el tiempo de bit de la señal digital mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

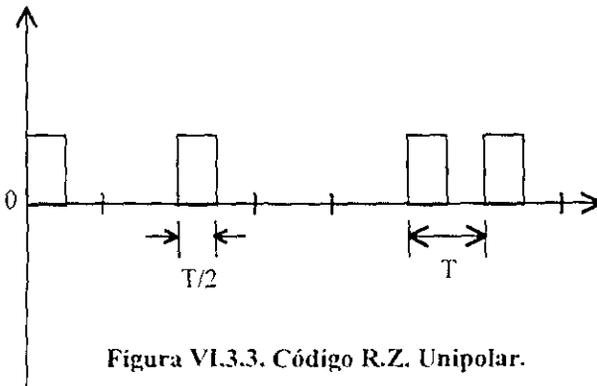


Figura VI.3.3. Código R.Z. Unipolar.

Código R.Z. Polar.

El código R.Z. Polar se caracteriza porque la señal se define entre tres valores de amplitud característicos:

Dos valores de amplitud predeterminados, desde cero hasta $+V$, y desde $-V$ hasta cero; y por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital con un tiempo de bit T dos niveles consecutivos de amplitud cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

Inicialmente, al primer "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T se le asignan dos niveles consecutivos de amplitudes: $+V$ y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

A continuación, se realiza la inversión en el proceso de codificación a la espera de la llegada del siguiente "uno" de la señal digital, el cual se codificará asignándole dos niveles consecutivos de amplitudes: $-V$ y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

En este momento se realiza de nuevo la inversión en el proceso de codificación que se utilizó para el primer "uno".

Todo el proceso se repite sucesivamente de forma cíclica, para la codificación de todos los "unos" de la señal digital.

La figura VI.3.4 representa la información binaria de la señal digital: 1.0.0.1.1.0. codificada a base de un código R.Z. Polar en el que $+V$, $-V$ cero son los valores de amplitud de la señal codificada T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital, mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

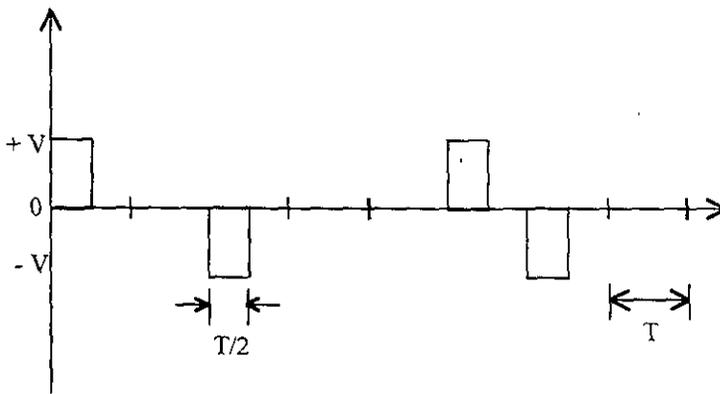


Figura VI.3.4. Código R.Z. Polar.

Código MANCHESTER Unipolar.

El código MANCHESTER Unipolar se caracteriza por que la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: desde cero hasta $+V$, desde $-V$ hasta cero.

El criterio de codificación seguido con el "cero" y con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" con un tiempo de bit T dos niveles consecutivos de amplitudes: cero y $+V$ de la señal codificada con duración unitaria respectiva $T/2$.

La figura VI.3.5 representa la información binaria de la señal digital: 1.0.1.0.0.1.1.0. codificada en base a un código Manchester Unipolar en el que $+V$ y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital, mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

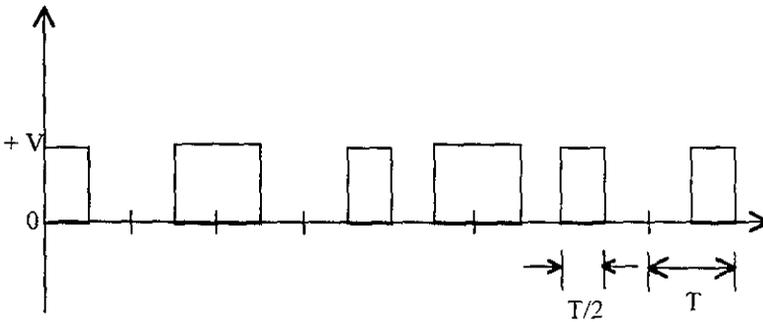


Figura VI.3.5. Código MANCHESTER Unipolar.

Códigos H.D.B. (H.D.B.3).

Las siglas de los códigos H.D.B.n, significan HIGH DENSITY BIPOLAR Code Order n o código bipolar de alta densidad de orden n.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital, el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T .

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas modificadas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

Los códigos H.D.B. son códigos de inversión alterna o polares modificados en los que se introducen intencionadamente violaciones de la regla estricta de la inversión alterna en la codificación de los niveles "uno" de la señal digital

Estas violaciones se realizan con arreglo a una serie de reglas predeterminadas para lograr una un mínima longitud de secuencias sin impulsos que facilitan la recuperación del sincronismo y, por tanto, la regeneración de la señal.

En un código H.D.B.n, se transmiten señales binarias con secuencias de hasta "n bits cero" como en los códigos polares, pero sustituyéndose cada secuencia de (n + 1) bits consecutivos cero por una secuencia de impulsos con un impulso de violación, con lo que se obtienen una secuencia con un número máximo de bits consecutivos cero.

El impulso de violación presenta siempre la misma polaridad que el impulsos anterior.

En la práctica se utiliza el código denominado H.D.B.3: se trata de un código ternario y que admite por tanto tres niveles de cuantificación en la codificación, por lo que la señal se define entre tres valores de amplitud característicos.

Dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta + V, desde - V hasta cero: por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

Su característica fundamental es la de ser capaz de tolerar hasta un máximo de tres bits consecutivos sin que se produzca un cambio de nivel, impulso de violación o impulso bipolar.

VI.4. Codificación para protección de errores.

La recodificación de las señales, frecuentemente limitadas en potencia, se realiza con asiduidad en los sistemas de transmisión ópticos y consiste en la adición de unos bits de redundancia a los símbolos codificados inicialmente para disminuir la probabilidad de error.

Durante el proceso de recodificación se asigna o transforma cada símbolo inicial de "m bits" en un símbolo de canal de "n bits", por lo que se añaden "m - n" bits de redundancia.

La supervisión y protección contra errores se logra con el criterio de mantener la variación de la suma digital a un valor máximo para cada uno de los símbolos de canal de n bits habitualmente: +1 ó -1.

Es esta variación de la suma digital la que nos permite realizar las tareas de supervisión y protección de errores.

El conjunto de los símbolos de canal con significado constituyen el código utilizado. Existen símbolos de canal sin significado por no pertenecer al código y que, cuando son recibidos, se interpretan como símbolos de canal erróneos.

La recodificación para protección de errores implica incrementar la velocidad de transmisión en un factor que nos viene dado por el cociente n/m y que se origina por la transformación que sufre cada símbolo de canal de n bits.

Los dos tipos de códigos que se utilizan habitualmente en las comunicaciones ópticas, para recodificar las señales y protegerlas contra los errores, son el código 1B/2B ó M.C M.I. y el código 5B/6B.

Las siglas del código M.C.M.I. significan MODIFIED CODE MARK INVERSION o código con inversión de marcas modificadas.

Código 1B/2B.

El código 1B/2B es un código unipolar y se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud característicos: cero y +V.

La recodificación de la señal se realiza a partir de una señal codificada en H.D.B.3, que es un código polar, mediante la adición de un nuevo bit a cada bit original de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de T.

Al nivel -V, codificado en H.D.B.3 con un tiempo de bit T, se le recodifica asignándole dos niveles consecutivos de amplitud cero de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de T.

El criterio de recodificación que se sigue con el nivel cero en H.D.B.3 con un tiempo de bit T consiste en asignarle dos niveles consecutivos de amplitudes cero y +V con una duración unitaria respectiva de T.

Código 5B/6B.

El código 5B/6B es un código polar y se caracteriza porque la señal se define entre tres valores de amplitud característicos.

Dos valores de amplitud predeterminados: desde cero hasta +V, y desde -V hasta cero; y por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

El criterio de recodificación que se sigue consiste en convertir cada palabra de 5 bits en una palabra de 6 bits, mediante una tabla de conversión de código o de recodificación, que se representa en la figura VI.4.1.

Los 5 bits de la palabra de entrada permiten un máximo de 32 combinaciones, mientras que con los 6 bits de la palabra recodificada son posibles un máximo de 64 combinaciones.

Palabra 5B		Palabra 6B					
		Grupo "+"		Grupo siguiente	Grupo "-"		Grupo siguiente
0	00000	50	110010	+	50	110010	-
1	00001	51	110011	-	33	100001	+
2	00010	54	110011	-	34	100010	+
3	00011	35	100011	+	35	100011	-
4	00100	53	110101	-	36	100100	+
5	00101	37	100101	+	37	100101	-
6	00110	38	100110	+	38	100110	-
7	00111	39	100111	-	7	000111	-
8	01000	43	101011	-	40	101000	+
9	01001	41	101001	+	41	101001	-
10	01010	42	101010	+	42	101010	-
11	01011	11	001011	+	11	001011	-
12	01100	44	101100	+	44	101100	-
13	01101	45	101101	-	5	000101	+
14	01110	46	101110	-	6	000110	+
15	01111	14	001110	+	14	001110	-
16	10000	49	110001	+	49	110001	-
17	10001	57	111001	-	17	010001	+
18	10010	58	111010	-	18	010010	+
19	10011	19	010011	+	19	010011	-
20	10100	52	110100	+	52	110100	-
21	10101	21	010101	+	21	010101	-
22	10110	22	010110	+	22	010110	-
23	10111	23	010111	-	20	010100	+
24	11000	56	111000	+	24	011000	+
25	11001	25	011001	+	25	011001	-
26	11010	26	011010	+	26	011010	-
27	11011	27	011011	-	10	001010	+
28	11100	28	011100	+	28	011100	-
29	11101	29	011101	-	9	001001	+
30	11110	30	011110	-	12	001100	+
31	11111	13	001101	+	13	001101	-

Figura VI.4.1.

CONCLUSIONES

En este trabajo lo que se trató de dar a conocer es el sistema de transmisión de datos por medio de la fibra óptica. Esta nueva tecnología trae consigo una mayor velocidad de transmisión que los otros tipos de comunicación, así como una mejor forma de llevarse a cabo, esto es posible debido a las propiedades intrínsecas que posee la fibra óptica

Como se pudo apreciar la fibra óptica sigue las leyes de la propagación de la luz, ya que debido a éstas es posible que se llegue a transmitir información a través de la fibra óptica, lo cual trae consigo grandes ventajas.

Dentro de un sistema de fibra óptica los elementos básicos que podemos considerar son el emisor el cual debe ser un convertidor de pulsos eléctricos a pulsos de luz ya sea una luz coherente como la que da los láseres ó bien el de un fotodiodo que proporciona una luz incoherente, el medio de transmisión que en este caso es nuestra fibra óptica con características propias descritas en el presente trabajo y un receptor que es un fotodiodo que se encarga de detectar los pulsos luminosos que recibe para posteriormente transformarlos en pulsos eléctricos.

Esta descripción es muy sencilla, ya que para poder transmitir una señal, primero esta debe ser digitalizada y codificada a cierto código como puede ser el RZ, NRZ, Manchester, HDB3, etc., para después ser convertida en pulsos luminosos con cierta longitud de onda y enviarla por la fibra óptica. En la fibra se tiene que analizar su ancho de banda, el tipo de fibra que es, esto es las características de la misma, además de a que distancia es necesario poner regeneradores, ya que éstos sirven para compensar la atenuación que sufre la señal, dándole potencia y reconstruyéndola. El último paso es el receptor, en el cual el fotodiodo debe tener una gran sensibilidad a la recepción, debido a que la señal llega con poca potencia y este debe sólo detectar la longitud de onda a la que se está utilizando.

En los sistemas por fibra óptica no sería apropiado transmitir por una sola fibra una sola señal, por ello se multiplexan o multicanalizan varias señales para que puedan viajar por una sola fibra óptica con lo cual es una gran ventaja, además que en la fibra óptica se puede utilizar la misma fibra para mandar y recibir información al mismo tiempo ya que las señales se manejan a diferentes longitudes de onda y con ello solo se ponen los detectores de longitud de onda que se necesitan.

Para concluir cabe mencionar que debido a la velocidad que puede manejar la fibra óptica, en un futuro se prevé que se pueda tener diferentes servicios digitales en las casas y en las oficinas, y en ello una renovación de las técnicas de acceso que puedan tener los diferentes usuarios, para una rápida obtención de información independientemente del tipo.

GLOSARIO

Absorción óptica: es transformación de la señal óptica (fotones) en señal eléctrica (electrones).

Ancho de banda eléctrico: se define el ancho de banda de una señal eléctrica como aquella frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica cae 3 dB eléctricos con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Ancho de banda óptico: se define el ancho de banda de una señal óptica como aquella frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica cae 3 dB ópticos con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Ancho de banda: se define el ancho de banda de una fibra óptica como aquella frecuencia a la cual la magnitud de la función de transferencia decrece hasta una fracción especificada, generalmente 3 dB, con respecto al valor que ésta presenta a frecuencia nula.

Apertura numérica: propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla.

Atenuación: la atenuación de una fibra óptica es la tasa de decrecimiento de la potencia óptica media con respecto a la distancia a lo largo de la fibra óptica.

Códigos de línea: se utilizan durante el proceso de codificación de las señales ópticas, previamente a la propagación de las mismas a través de las fibras ópticas.

Dispersión modal: Es el fenómeno físico de la dispersión entre modos. se produce porque la velocidad de propagación del haz lumínico por el núcleo de la fibra óptica no permanece constante.

FDM: multicanalización por división de frecuencia.

Índice de refracción: es relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad en el dieléctrico.

Longitud de onda (λ): se define como la relación entre su velocidad de propagación y su frecuencia.

Modos: número de longitudes de ondas que pueden viajar el mismo tiempo en una fibra óptica.

Modulación directa de intensidad lumínica: en este tipo de modulación, la potencia lumínica de la fuente óptica es proporcional a la variación en el tiempo de la señal eléctrica.

Multicanalización: transmisión de varias señales en un canal único

Recodificación: la recodificación de las señales consiste en la adición de unos bits de redundancia a los símbolos codificados inicialmente para disminuir la probabilidad de error.

Regenerador óptico: realizan una amplificación y regeneración de la señal óptica presente en su entrada, presentando siempre en su salida una señal óptica

TDM: multicanalización por división de tiempo.

WDM: multicanalización por división de longitudes de onda.

BIBLIOGRAFIA.

Jardon. Hildeberto, "Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas". Editorial Alfaomega, México, 1995.

Jiménez, J. Carlos, "Fibras ópticas", Editorial CEAC, España, 1993.

Nérou, J. Pierre, "Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas". Editorial Trillas, México, 1991.

Sanz, J. Martín, "Comunicaciones ópticas", Editorial Paraninfo, España. 1996.

Tur, Juan, "Todo sobre las fibras ópticas". Editorial Marcombo. España. 1989.