



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

COMUNICACIONES. PARAMETROS EN EL
DISEÑO DE UN ENLACE POR FIBRA OPTICA

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A
VICTOR FRANCISCO MAINFELT MOGUEL

ASESOR: ING. JORGE RAMIREZ RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1999.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

44
Zej

2017 0044



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES 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. Parámetros en el diseño de un enlace
por fibra óptica.

que presenta el pasante: Victor Francisco Mainfelt Manuel,
con número de cuenta: 9106132-4 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 14 de diciembre de 19 98

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

GRACIAS:

A Dios nuestro señor quien medió la vida, y hoy me permite llegar hasta éste momento con todas las bendiciones que siempre me ha otorgado y que nunca me ha dejado desfallecer.

A mis padres, a quienes debo todo lo que soy y de los cuales me siento muy orgulloso, ya que nunca podré dejar de agradecer su apoyo, comprensión, y ejemplo, pero aún más orgulloso me siento del amor que siempre nos han brindado a mi y a mis hermanos. Los amo.

A mis hermanos Erika y Gerardo; en especial a “Kika” quien siempre me ayudó a salir adelante. A Samy por la alegría que me brinda.

A Cecilia Iraola por su amistad y apoyo incondicional.

A todos aquellos quienes con su afecto me impulsaron a lograr mis metas.

A mis profesores, compañeros, y a la FES-C quienes forman parte de una etapa más en mi vida.

Victor F. Mainfelt Moguel

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
I. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES.....	6
1.1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES.....	6
1.2 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN.....	7
1.3 SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR CABLE	
METÁLICO.....	9
1.4 SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS ÓPTICAS.....	10
1.4.1 Características de los Sistemas de Comunicaciones	
por Fibra Óptica.....	11
II. ASPECTOS GENERALES Y TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE	
COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA.....	14
2.1 GENERALIDADES.....	14
<i>Ventajas</i>	14
<i>Desventajas</i>	15
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	15
2.3 REFRACCIÓN DE UNA ONDA DE LUZ.....	16
2.4 PROPAGACIÓN EN UNA FIBRA ÓPTICA.....	21
2.4.1 Apertura Numérica.....	26
2.5 AMPLIFICADORES ÓPTICOS: EL LÁSER.....	26
2.5.1 Tipos de Láser.....	26
2.5.2 Propiedades del Láser.....	30
<i>Potencia Radiante (Flujo)</i>	30
<i>Coherencia</i>	30
<i>Longitud de Coherencia</i>	31
<i>Divergencia del Haz</i>	32

III. CABLES DE FIBRA ÓPTICA.....	33
3.1 ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA.....	33
3.1.1 Estructura Ajustada.....	34
3.1.2 Estructura Holgada.....	34
3.1.3 Sustancias de Relleno.....	35
<i>Protección secundaria</i>	35
<i>Intersticios del cable</i>	36
3.1.4 Cubiertas de Protección.....	36
<i>Cubierta de Polietileno</i>	36
<i>Cubierta de PVC</i>	37
<i>Cubiertas de Plásticos Fluorados</i>	37
<i>Cubiertas de Compuestos Libres de Halógenos</i>	37
3.1.5 Cubiertas.....	38
3.1.6 Alma del Cable.....	38
3.1.7 Elementos de Tracción del Cable.....	38
3.1.8 Elementos de Relleno.....	39
3.1.9 Elementos de Armado.....	39
3.2 CLASIFICACIÓN DEL CABLE SEGÚN EL NÚMERO DE FIBRAS ÓPTICAS.....	40
3.2.1 Cables Monofibra.....	40
3.2.2 Cables Bifibra.....	40
3.2.3 Cables Multifibra.....	41
3.3 TIPOS DE CABLES ÓPTICOS PARA USOS ESPECIALES.....	41
3.3.1 Cables para Tendidos Subterráneos.....	41
3.3.2 Cables Autoportantes.....	42
3.3.3 Cables Compuestos Tierra-Ópticos.....	42
3.3.4 Cables Submarinos.....	42

3.4 CABLES.....	43
3.5 TENDIDO DE CABLES DE FIBRA ÓPTICA.....	52
3.5.1 Requisitos que hay que cumplir.....	53
3.5.2 Métodos de Tendido.....	54
 IV. FUENTES DE RADIACIÓN ÓPTICA.....	 57
4.1 ELECCIÓN DE LA FUENTE.....	57
4.2 DIODOS EMISORES DE LUZ.....	59
4.3 DIODOS LÁSER.....	62
4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES ÓPTICAS.....	64
<i>Diodos de Emisión Superficial</i>	65
<i>Diodos de Emisión Lateral</i>	66
<i>Láseres de Inyección (LD)</i>	66
 V. DETECTORES DE RADIACION ÓPTICA.....	 68
5.1 ELECCIÓN DEL DETECTOR.....	68
5.2 FOTODETECTORES.....	70
5.3 FOTODETECTORES PIN.....	70
5.4 FOTODETECTORES DE AVALANCHA.....	74
 VI. REPETIDORES.....	 76
 VII. CONECTORES Y EMPALMES.....	 77
 VIII. PLANIFICACIÓN DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA.....	 80
8.1 METODOLOGÍA DE LA PLANIFICACIÓN.....	81

8.2 MEDIO FÍSICO DEL ENLACE.....	81
8.2.1 Viabilidad y Configuración del Tendido.....	81
8.2.2 Trazado del Tendido.....	82
<i>Configuración del Tendido Terrestre</i>	82
<i>Configuración del Tendido Aéreo</i>	83
<i>Configuración del Tendido Submarino</i>	85
<i>Sistema U.S.S.</i>	86
<i>Sistema R.S.S.</i>	86
8.2.3 Distancia del Enlace.....	87
8.2.4 Ubicación de los Equipos.....	87
8.3 PLANIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN DE UN TENDIDO DE FIBRA ÓPTICA.....	88
8.3.1 Planificación de Atenuaciones del Tendido.....	88
<i>Atenuación Introducida por el Conductor de Fibra Óptica</i>	88
<i>Atenuación Introducida por los Empalmes de Fusión</i>	89
<i>Atenuación Introducida por Conectores Ópticos</i>	91
<i>Margen de Reserva de Atenuación</i>	92
<i>Margen de Regeneración</i>	93
<i>Margen de Recepción</i>	93
<i>Margen de Reserva del Enlace</i>	94
<i>Margen de Reserva del Enlace en Lado de Transmisión</i>	94
<i>Margen de Reserva del Enlace en Lado de Recepción</i>	95
8.3.2 Cálculo del Ancho de Banda del Tendido.....	96
<i>Ancho de Banda con Fibras Ópticas Multimodo</i>	97
<i>Ancho de Banda con Fibras Ópticas Monomodo</i>	101
8.3.3 Ley de Concatenación del Ancho de Banda.....	102
8.4 CÁLCULO DEL ANCHO DE BANDA REQUERIDO POR EL ENLACE.....	103
8.4.1 Cálculo del Ancho de Banda Requerido por los Sistemas Digitales....	103

8.5 CARACTERIZACIÓN DEL TRANSMISOR.....	104
<i>Potencia de emisión en dBm</i>	104
<i>Ancho de banda del transmisor</i>	104
8.6 CARACTERIZACIÓN DEL RECEPTOR.....	104
<i>Cálculo del margen dinámico</i>	105
<i>Ancho de banda del receptor</i>	105
8.7 ANÁLISIS GLOBAL DE LA VIABILIDAD DEL ENLACE.....	105
8.7.1 Balance Global de Potencias.....	105
8.7.2 Ancho de Banda Global del Enlace.....	106
CONCLUSIONES.....	107
GLOSARIO.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	112

INTRODUCCIÓN

El desarrollo histórico de los sistemas de comunicaciones de tipo óptico data desde el año 1790, cuando 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.

Para el año de 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 misma.

Hacia 1889, Alexander Graham Bell, inventa un aparato llamado "Photophon", que permitía transmitir la voz a través de una onda lumínica.

En el año de 1910 Hondros y Deybe complementan los estudios teóricos sobre la propagación en las guíaondas dieléctricas, y 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 construidos 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 la recubre por primera vez de un revestimiento, lo que permite su utilización práctica. Es la primera vez que se emplea el término *Fibra Óptica*.

En el año 1958, Arthur Schawlow Charles H. Townes, desarrollan el LÁSER 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 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.

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, 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 Pos Office británico realiza pruebas experimentales con un sistema de transmisión óptico de 140 Mbps en un vano de 9 km entre Hitchin y 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 1.500 nm con fibra óptica monomodo en un vano de 29 km sin repetidores intermedios.

En el año 1979, NTT, Nipon Telegraph and Telephone, realiza un enlace experimental con un sistema de transmisión de 400 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.

El avance tecnológico y las necesidades de las nuevas generaciones han impulsado a los sistemas de telecomunicación a niveles que tal vez nunca se pensaron al grado de hacer ya indispensable la instalación de sistemas cada vez mas sofisticados y eficientes los cuales puedan soportar las demandas de tráfico, velocidad y calidad de los enlaces.

Las mejoras en los equipos de transmisión y recepción, el desarrollo de nuevos y variados materiales en los medios físicos de transmisión, el desarrollo y optimización de los protocolos y técnicas de transmisión entre otros factores, han permitido la evolución de los sistemas de comunicación.

Los actuales sistemas de comunicación presentan ventajas y desventajas aún entre ellos mismos, y la elección de uno u otro dependerá de las necesidades y limitaciones que se presenten para dar solución al problema de comunicación.

Hoy en día de los enlaces por fibra óptica han comenzado a ser una de las mejores opciones de comunicación, en los lugares en donde las características generales para establecer un enlace de este tipo así lo permiten.

En el presente trabajo pretendo dar un panorama global de los componentes esenciales de un enlace por fibra óptica así como los parámetros y consideraciones que se deben de tener en mente al momento de planear un enlace por fibra óptica.

De esta forma es como presento ocho capítulos en los cuales se describen las diferentes partes que integran el enlace, desde la fuente óptica hasta el receptor óptico pasando por el medio de transmisión que es la fibra óptica, así como los parámetros influyentes y consideraciones indispensables en un enlace por fibra óptica.

El primer capítulo es una introducción a diferentes sistemas de comunicaciones para poder así diferenciar y apreciar las características que integran a estos sistemas y compararlas con las que presentan los sistemas de comunicación por fibra óptica.

En el segundo capítulo presento los aspectos generales y teóricos de los sistemas de comunicación por fibra óptica donde se observan más detenidamente las ventajas y desventajas de los mismos. Por otra parte se observan los principios teóricos que a este tipo de sistemas de comunicación caracterizan.

El tercer capítulo expongo lo que a cables de fibra óptica concierne, mostrándonos parámetros tales como estructuras, cubiertas, clasificación, usos especiales, entre otros.

El cuarto capítulo lo relaciono con las diferentes fuentes ópticas que se pueden emplear en enlaces por fibra óptica. Aquí también presento un análisis comparativo entre las fuentes ópticas expuestas.

En el quinto capítulo doy a conocer los detectores comúnmente empleados en un enlace por fibra óptica, para realizar una elección de estos.

En el sexto capítulo menciono la función del repetidor.

En el séptimo capítulo refiero las principales características de empalmes y conectores de fibra óptica, así como los factores típicos que propician las diferentes atenuaciones.

Finalmente en el octavo capítulo abordo lo relacionado a la planificación de un enlace por fibra óptica, en éste se presentan los parámetros e importantes consideraciones que se deben de realizar al planear un enlace de este tipo.

I. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES

1.1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Como todos los sistemas de comunicaciones, los de fibras ópticas 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 1.1.

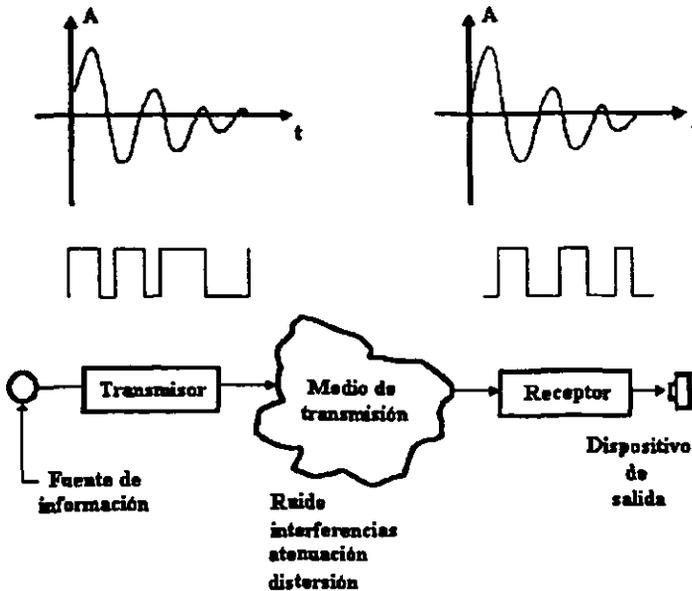


Figura 1.1. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones punto a punto

En el transmisor se genera la información que se desea comunicar y se le da una forma adecuada para enviarse a través del medio de transmisión, el cual introduce atenuación, distorsión, y es susceptible a interferencias electromagnéticas. La fuente de información puede ser cualquier transductor que transforma 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 las 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 el medio de transmisión los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar en: sistemas de radiocomunicación, sistemas por cable metálico y sistemas por fibras ópticas.

1.2 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN

Todos los sistemas de radiocomunicación emplean el espacio como medio de transmisión. La información viaja en forma de ondas electromagnéticas no guiadas desde el transmisor hasta el receptor. Para que el transmisor radie energía electromagnética al espacio circunvecino es necesario emplear un transductor, el que transforme 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 del 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 fig. 1.2.

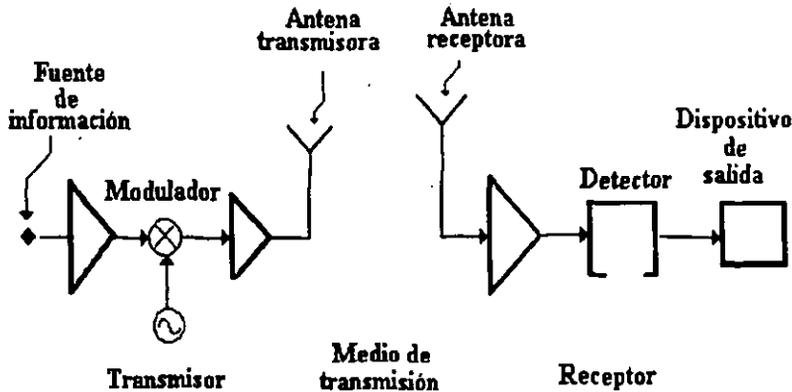


Figura 1.2. Diagrama de bloques de un sistema de radiocomunicación punto a punto

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

1.3 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 de 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) se muestra en la figura 1.3.

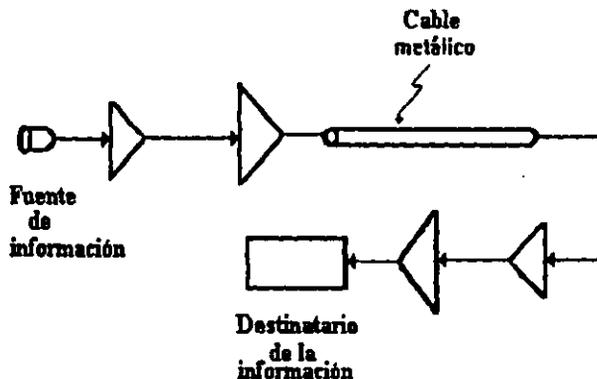


Figura 1.3. Enlace punto a punto de un sistema por cable metálico

El hecho de que estos sistemas empleen un medio físico que es 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 el sistema
- Comunicación móvil sólo en áreas pequeñas
- Dificultad de comunicación punto – multipunto
- Menor 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.

1.4 SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS ÓPTICAS

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 de bloque de un sistema de comunicaciones punto a punto por fibras ópticas donde se incluyen los elementos básicos de estos sistemas se muestra en la figura 1.4.

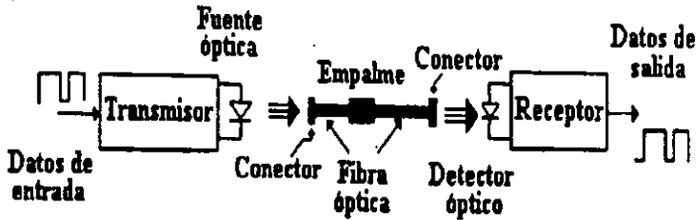


Fig. 1.4. Enlace de comunicaciones punto a punto por fibras ópticas

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 ya que este es el medio físico que se requiere.

1.4.1 Características de los Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica

<i>Características</i>	<i>Ventajas</i>
ELIMINACIÓN DE LAS INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS	Seguridad de alta calidad de transmisión
	Reducción de costos de protección contra el ruido
	Localización cercana a líneas de alta tensión

**AISLAMIENTO
ELÉCTRICO**

**Eliminación de los problemas de bucle
de tierra**

Travesía segura en zonas peligrosas

Seguridad contra descargas eléctricas

Espaciamiento grande entre repetidoras

**PÉRDIDAS
PEQUEÑAS**

**Confiabilidad grande gracias al número
pequeño de repetidoras**

Menor mantenimiento

Capacidad grande de transmisión

**ANCHO DE BANDA
GRANDE**

Eliminación de igualadores

**Atenuación independiente del ancho de
banda del mensaje transmitido**

**DIÁMETRO 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**

II. ASPECTOS GENERALES Y TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA.

2.1 GENERALIDADES

La línea de fibra actúa como una guía de onda dieléctrica para portar energía luminosa, la que es modulada por una señal eléctrica de información que puede ser de naturaleza analógica o digital. Las líneas de fibras ópticas tienen varias ventajas sobre las líneas conductoras convencionales que portan ondas electromagnéticas con mucho menor frecuencia que las ondas de luz. Las ventajas y desventajas pueden resumirse como sigue:

Ventajas

a) Cables más ligeros, con un radio de flexión más pequeño, ocupan menos espacio en los ductos; son ideales para barcos y aeronaves en las que el espacio es muy importante, pues se necesitan menos hombres para su manejo.

b) Un ancho de banda disponible muy amplio; se pueden transmitir simultáneamente señales de voz, datos y vídeo por sistemas de alta capacidad.

c) Habilidad para manejar el crecimiento natural bajo demanda de capacidad.

d) Secciones de baja pérdida más largas entre repetidores y regeneradores.

e) Alta confiabilidad y larga vida.

f) Está libre de interferencias electromagnética; puede usarse en situaciones eléctricas ruidosas.

g) No hay inducción ni conducción; no hay radiación ni interferencia de otros circuitos y sistemas.

h) Las continuas mejoras tecnológicas reducen constantemente el costo y se producen sistemas y dispositivos más eficientes.

i) Mayor seguridad, ya que es muy difícil intervenir un cable de fibra.

j) Alta privacidad de la transmisión.

k) Niveles pequeños de potencia eléctrica en el transmisor.

l) Se facilita la movilidad en áreas reducidas (gracias a su peso y dimensiones menores en comparación con el peso y dimensiones de los conductores eléctricos).

m) Gran abundancia de la materia prima SiO_2 .

n) Interferencias pequeñas entre fibras.

o) Cableado de muchas fibras en un solo ducto.

p) Mayor economía para enlaces mayores de 2km y velocidades mayores a 2 MB/s.

Desventajas.

1. Sensibilidad limitada por el ruido cuántico.

2. Las derivaciones de la fibra óptica son más complicadas e introducen mayores atenuaciones en comparación con las derivaciones con cable eléctrico.

3. Como en el caso de los enlaces por cable eléctrico se requiere de un medio físico.

4. Movilidad reducida en comparación con los sistemas de radiocomunicación.

5. Mayor dificultad en comunicaciones multipunto: las derivaciones pasivas introducen grandes niveles de atenuación (idealmente 3 dB, para derivaciones 1:1).

6. Las fuentes ópticas son relativamente de alta no linealidad.

2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

En su forma más simple, un sistema de comunicación por fibra óptica está constituido por tres elementos, esencialmente:

a) Un modulo de emisión, que tiene por función transformar la información en forma de señal eléctrica a información en forma de luz. A este módulo se le llama emisor óptico.

b) Un canal de transmisión de la luz, que es la fibra óptica.

c) Un módulo de recepción, que tiene por función transformar la información óptica recibida en información con la forma de señal eléctrica. A esto se le conoce como receptor óptico.

Las transmisiones a distancias demasiado grandes pueden necesitar la utilización de uno o varios repetidores, cuya función es amplificar y/o regenerar la señal óptica.

En la figura 2.1 se muestra un sistema básico de telecomunicación unidireccional por fibra óptica.

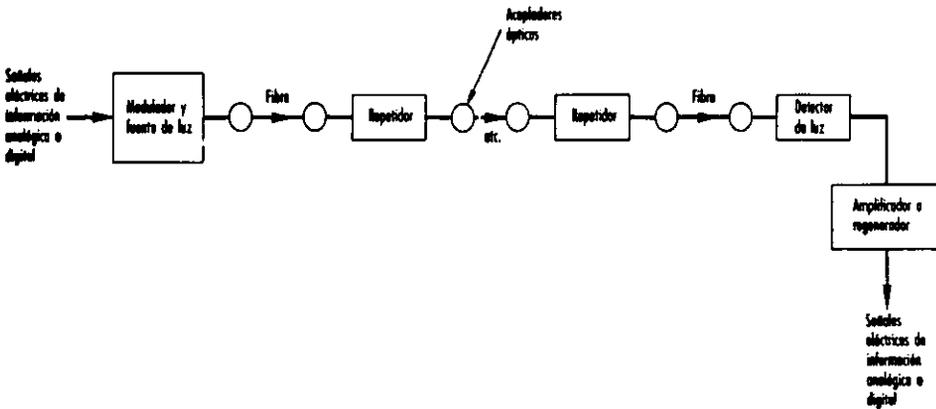


Figura 2.1. Sistema básico de telecomunicación unidireccional por fibra óptica.

2.3 REFRACCIÓN DE UNA ONDA DE LUZ

Cuando una onda de luz pasa de un material a otro, la dirección del viaje cambiará. A esto se le llama *refracción*. Cuando la onda luminosa llega a la unión de aire y otro material, como agua o vidrio, en un ángulo de incidencia φ_i , entonces el ángulo de refracción φ_r con que abandona la unión es diferente del ángulo de incidencia φ_i . En la figura 2.2 se ilustra el principio de la refracción de la luz.

Por ejemplo en la figura 2.2, usando aire y cualquiera de los dos tipos diferentes de vidrio, la línea trazada perpendicularmente al punto en que la onda de luz toca la unión de los materiales se le llama línea *normal*. El ángulo de incidencia φ_i es el mismo en las

figuras 2.2 (a) y 2.2 (b) pero los ángulos de refracción son diferentes, donde φ_{ra} y φ_{rb} se refieren a los tipos de vidrio A y B, respectivamente.

La razón $\text{sen } \varphi_i / \text{sen } \varphi_r$ es una *constante* para dos materiales cuales quiera y se llama **índice de refracción** (η) para los dos materiales que están en contacto entre sí. Ya que el aire tiene a la unidad como índice de refracción, y se usa como uno de los materiales de las figuras 2.2 (a) y 2.2 (b), la razón es llamada *índice absoluto de refracción* de los tipos de vidrio A y B. Así, de la figura 2.2 (a), el índice absoluto de refracción para el vidrio A está dado por:

$$\eta = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_{ra}}$$

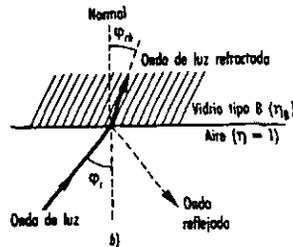
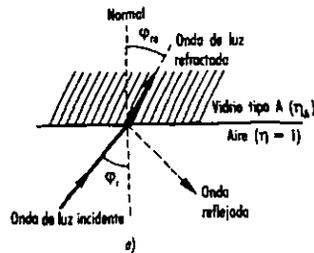


Figura 2.2. Refracción de la luz por dos materiales diferentes

Y claramente tiene un valor menor que para el vidrio B, el cual, a partir de la figura 2.2 (b), está dado por:

$$\eta_B = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r}$$

ya que $\varphi_{ra} > \varphi_{rb}$.

Si ahora ponemos a los dos tipos de vidrio en contacto entre sí, la refracción de la onda luminosa dependerá del sentido del viaje, lo que se ilustra en la figura 2.3. Una onda luminosa que pasa de un material de menor índice de refracción absoluto a un material de mayor índice de refracción absoluto se curva *hacia* la normal, lo cual se ilustra en la figura 2.3(a).

El índice de refracción de los dos tipos de vidrio se da por:

$$\eta_1 = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{\eta_B}{\eta_A} \quad \text{con } \eta_B > \eta_A$$

Pero si la onda luminosa pasa de un índice de refracción mayor a otro menor, como se muestra en la figura 2.3 (b), se curva *alejándose* de la normal. El índice de refracción entre los dos tipos de vidrio ahora se da por:

$$\eta_2 = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{\eta_A}{\eta_B} \quad \text{con } \eta_B > \eta_A$$

Es claro que η_2 es mayor que η_1 . Por esto, hay dos valores posibles de índice de refracción para esos dos materiales, dependiendo de la dirección en que viaja la onda luminosa.

$$\text{ya que } \eta_1 = \frac{\eta_B}{\eta_A} \text{ y } \eta_2 = \frac{\eta_A}{\eta_B} \text{ entonces } \eta_1 = \frac{1}{\eta_2}$$

Esta relación inversa ocurre para dos materiales diferentes, cualesquiera que éstos sean.

En las figuras 2.3 (a) y 2.3 (b), la mayor parte de la energía luminosa se refracta, pero alguna se *refleja* de la unión con un ángulo igual al ángulo de incidencia φ_i como se indica.

En la figura 2.3 (b), donde la luz pasa hacia un material de menor índice de refracción absoluto, si se aumenta el ángulo de incidencia φ_i , el ángulo de refracción φ_r también aumenta. Cuando el ángulo de refracción se aproxima a los 90° , la onda luminosa no pasa hacia el vidrio A, sino que será reflejada *totalmente*, como se ilustra en la figura 2.4.

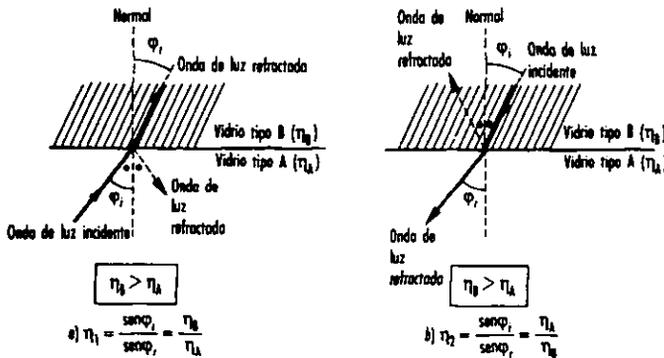


Figura 2.3. Refracción recíproca de la luz por dos materiales diferentes

El ángulo de incidencia en el cual ocurre primero la **reflexión total** es llamado el **ángulo crítico** φ_c para los dos tipos de vidrio. Las ondas luminosas que inciden en ángulos *mayores de* φ_c también serán reflejadas totalmente.

Ahora, de la figura 2.3 (b),

$$\frac{\text{sen} \theta_i}{\text{sen} \theta_r} = \frac{\eta_B}{\eta_A}, \quad \text{entonces :}$$

$$\text{sen} \theta_i = \frac{\eta_A}{\eta_B} \text{sen} \theta_r$$

De la figura 2.4, para el ángulo de incidencia crítico φ_c ,

$$\varphi_r = 90^\circ \quad \text{y} \quad \text{sen } 90^\circ = 1$$

$$\therefore \text{sen } \theta_c = \frac{\eta_A}{\eta_B} \quad \text{y} \quad \theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{\eta_A}{\eta_B}$$

Ahora, η_B siempre es ligeramente mayor que η_A , por lo que

sen φ_c será menor que 1

y sen φ_c será menor de 90°

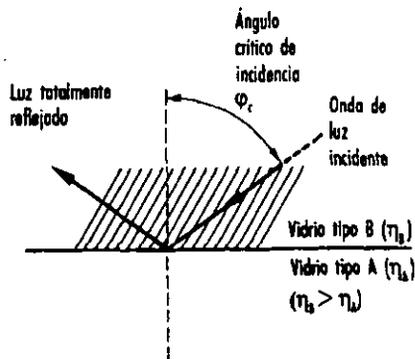


Figura 2.4. Reflexión total de la luz por dos materiales diferentes.

Por ejemplo, en un cable típico de fibra óptica, $\eta_A = 1.45$ y $\eta_B = 1.47$.

$$\therefore \text{sen } \theta_c = \frac{1.45}{1.47} = 0.9864 \quad \therefore \varphi_c = 80^\circ 32'$$

2.4 PROPAGACIÓN EN UNA FIBRA ÓPTICA

En este apartado se presentan las principales características de comportamiento de una fibra óptica, como son: propagación multimodal, propagación monomodal, fibra de índice escalonado y fibra de índice graduado.

En la figura 2.5 se muestra el corte longitudinal de una fibra. Una onda luminosa que viaja a lo largo del núcleo y alcanza al recubrimiento en el ángulo crítico de incidencia φ_c , se reflejará totalmente. Entonces, nuevamente toca la superficie opuesta del recubrimiento en el ángulo crítico φ_c , por lo que de nuevo se refleja totalmente. La onda luminosa se propaga entonces a lo largo del núcleo por una serie de reflexiones totales del recubrimiento.

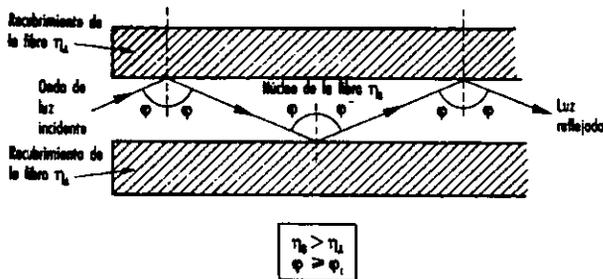


Figura 2.5. Propagación de la luz a lo largo de un núcleo de fibra óptica

La energía luminosa que emana de una fuente diferente a un pequeño punto, tendrá varias trayectorias con ángulos de propagación diferentes y, aún más, probablemente tendrá diversos colores con diferentes frecuencias y longitudes de onda. Cualquier otra onda luminosa que toque el recubrimiento en el valor crítico o por arriba del mismo, también se reflejará totalmente y, por tanto, será propagada a lo largo del núcleo. Cualquier onda luminosa que toque el recubrimiento en un ángulo *por debajo* del valor crítico, pasará hacia el recubrimiento para ser absorbida por éste.

Es evidente que hay un cambio súbito del índice de refracción absoluto en la unión del núcleo y el recubrimiento, lo cual se ilustra en el diagrama de perfil de índice de refracción de la figura 2.6. Por esto, a la fibra se le llama *fibra de índice escalonado* y ya hemos visto que puede portar muchas ondas luminosas diferentes, por lo que ocurre la *propagación multimodal de índice escalonado*, como se ilustra en la figura 2.7.

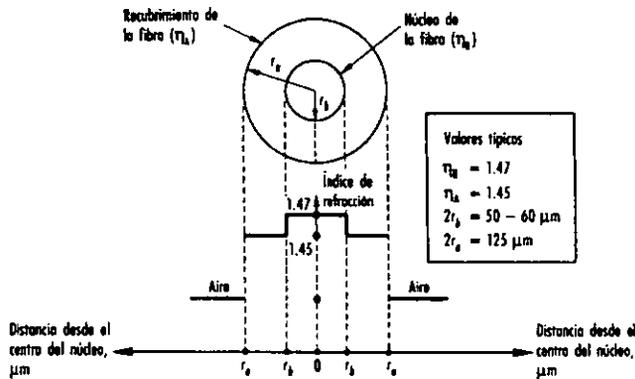


Figura 2.6. Perfil del índice de refracción para una fibra multimodal de índice escalonado

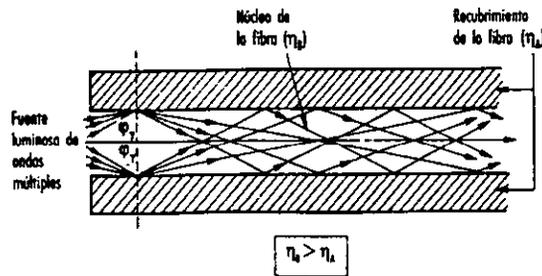


Figura 2.7. Propagación multimodal de índice escalonado

Las diferentes ondas luminosas que viajan a lo largo del núcleo tienen trayectorias de propagación de diferente longitud, por lo que tomarán diferentes tiempos para alcanzar un destino determinado. Esto produce la distorsión conocida como *dispersión por tiempo de tránsito*, lo que introduce un límite superior de la razón a la cual puede modularse la luz por una señal eléctrica digital o analógica. De lo contrario, las variaciones o pulsos sucesivos de luz se confundirían entre sí y causarían la dispersión de la información que está siendo transmitida. Es por ello que las fibras multimodales de índice escalonado se usan generalmente para enlaces de datos que requieren de una capacidad y ancho de banda relativamente bajos.

Los problemas de dispersión por tiempo en tránsito pueden superarse haciendo el núcleo muy delgado, de manera que el diámetro sea igual que la longitud de la onda luminosa que será propagada, lo cual se ilustra en la figura 2.8. La propagación resultante de una onda luminosa sencilla se llama *propagación monomodal* y se ilustra en la figura 2.9.

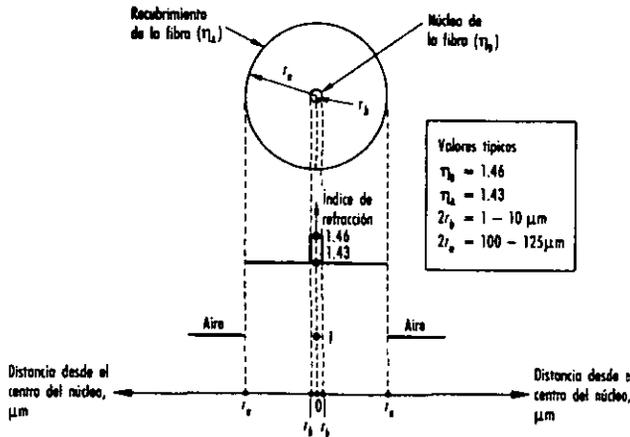


Figura 2.8. Perfil del índice de refracción para una fibra monomodal de índice escalonado

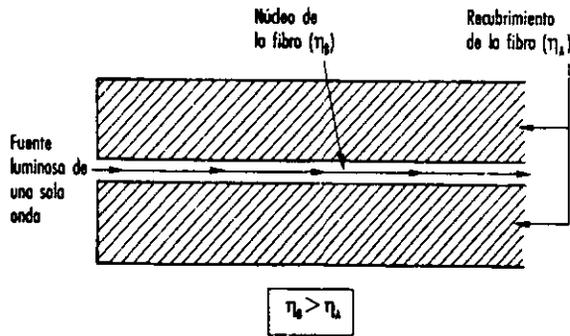


Figura 2.9. Propagación monomodal de índice escalonado

A este tipo de fibra se le llama *fibra monomodal de índice escalonado*. Sin embargo, el uso de núcleos muy delgados crea dificultades mecánicas en la manufactura, manejo y unión de las fibras y, además, es muy caro. El uso de fibras monomodales de índice escalonado generalmente se limita a sistemas de muy alta capacidad de gran ancho de banda, como cables submarinos, donde el gasto se justifica por las utilidades generadas.

Para sistemas de ancho de banda y capacidad intermedia, como los que están en operación actualmente, se usa un método menos caro para superar la dispersión por tiempo en tránsito. El núcleo está hecho de un material que tiene una refracción absoluta *graduada*, en lugar de un valor fijo, el cual es mayor en el centro del núcleo y disminuye gradualmente hacia la orilla exterior en la que toca el recubrimiento. A esto se le llama *fibra de índice graduado*, cuyo perfil se ilustra en la figura 2.10.

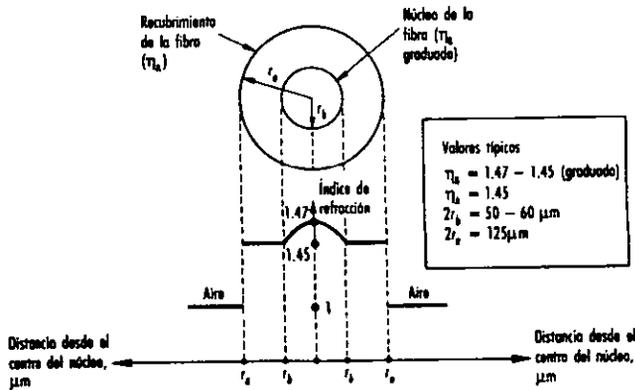


Figura 2.10. Perfil del índice de refracción para una fibra multimodal de índice graduado

En la figura 2.11 se muestra la propagación de la energía luminosa por ondas múltiples, donde las ondas individuales se refractan gradualmente en el núcleo de índice graduado, en lugar de ser reflejadas por el recubrimiento. Las ondas que viajan a diferentes ángulos de incidencia viajarán distancias diferentes desde el eje central horizontal, antes de que sean refractadas de regreso, para cruzar nuevamente el eje central.

A pesar de que las ondas con un gran ángulo de incidencia viajan más lejos que aquellas que tienen un ángulo más pequeño, el decremento del índice de refracción también permite una mayor velocidad de propagación de la energía. Como resultado, todas las ondas alcanzan un punto dado a lo largo de la fibra virtualmente al mismo tiempo, reduciendo grandemente la dispersión por tiempo en tránsito. A esto se le llama **propagación multimodal de índice graduado**.

En los tres tipos de fibra descritos anteriormente, el grueso del recubrimiento debe ser de varias longitudes de onda a fin de prevenir pérdidas de energía luminosa debidas a la absorción.

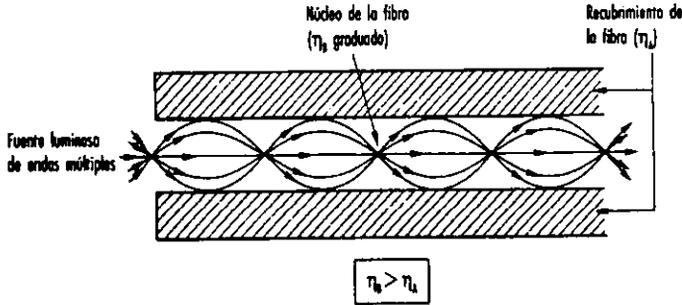


Figura 2.11. Propagación multimodal de índice graduado

2.4.1 Apertura Numérica

Es el valor numérico del seno del ángulo máximo de aceptación del haz lumínico en la fibra. Depende únicamente del valor de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. Es adimensional.

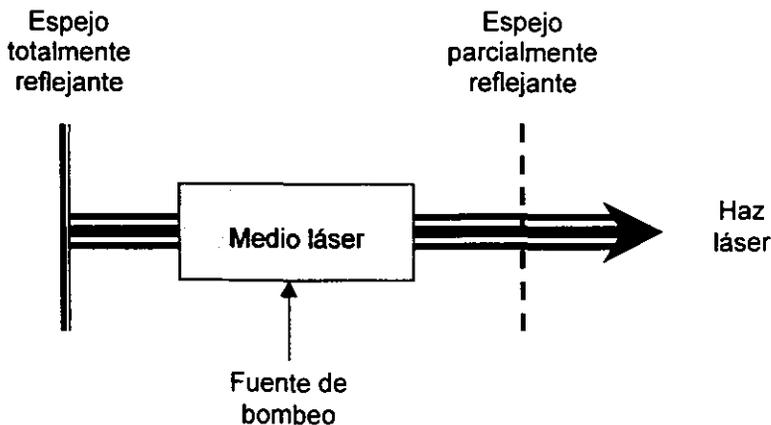
2.5 AMPLIFICADORES ÓPTICOS: EL LÁSER

2.5.1 Tipos de Láser

El propósito de este apartado no es hacer un estudio profundo de los diferentes tipos de láser que existen, más bien se pretende hacer mención de ellos y observar algunas de sus características, para de esta forma ubicar a los tipos de emisores que conciernen a las comunicaciones ópticas.

Los requisitos básicos en cualquier láser son idénticos. En primer lugar, se necesita un medio que presente la estructura de nivel de energía deseada para permitir el efecto

láser. Por ejemplo, el medio puede ser un gas, un cristal sólido aislante, un líquido o un cristal semiconductor. Estas líneas de demarcación también proporcionan un medio por clasificar al láser según la naturaleza física de su medio activo: por consiguiente, se tienen láser de *estado sólido*, láser *gaseoso*, láser *coloreados* y láser *semiconductores*, para mencionara algunos de los tipos de láser más conocidos. En segundo lugar, para establecer una inversión de poblaciones es necesario bombear energía al sistema. El método de bombeo utilizando también depende del medio activo. En el láser gaseoso, la excitación se suministra generalmente haciendo pasar una descarga eléctrica a través del gas; los láser de estado sólido suelen bombearse inundando el cristal con radiación intensa de un tubo de destellos; los láser coloreados se bombean mediante una lámpara estroboscópica (de destello) o a partir de otros láser; los láser semiconductores se bombean al dispositivo por medio de una inyección de corriente. Por último, se necesita un mecanismo mediante el cual sea posible introducir realimentación óptica y así mantener la ganancia del sistema por encima de todas las pérdidas.



2.12. Esquema de los elementos del láser

Aunque actualmente existen a disposición varios cientos de láser diferentes, en ingeniería sólo son de uso común unos cuantos tipos. En las tablas siguientes 2.1a - 2.1e se

enumeran las características de los principales.

Tabla 2.1a

Principales tipos de láser: gaseoso

Medio	Principales Longitudes de onda.	Salida	Modo	Eficiencia Típica %	Diámetro de haz típico (mm)	Divergencia típica (mrad)
HeNe	633 nm	0.1 - 50 mW	oc	0.1	1	1
Argón	488, 514 nm	5mW - 20W	oc	0.1	1	1
Kriptón	647 nm	5 mW - 6 W	oc	0.05	1	1
HeCd	325 nm	1 - 10 mW	oc	0.1	1	1
	oc 442 nm	2 - 50 mW	oc	10		
CO ₂	10.6 μm	20W - 15kW	oc	10	25	2
CO ₂ (TEA)	10.6μm	30 mJ - 150J	50-100ns pulsos hasta 1kHz	5	50	5

Tabla 2.1b

Principales tipos de láser: de estado sólido

Medio	Principales longitudes de onda	Salida	Modo	Eficiencia típica %	Diámetro de haz típico (mm)	Divergencia típica (mrad)
Rubi	694nm	30mJ-100J	10 ns-10 ms hasta 3 Hz prf	0.5	5-10	5
Nd-YAG	1.064μm	10mj-150J	10 ns - 1 ms hasta 50 KHz prf	1-2	1-10	5
Nd-YAG (bombeo en el diodo)	1.064 μm	1-10 mW	oc	5	1	1
Nd-Cristal	1.06μm	100mJ-100J	50μs - 1ms hasta 2 Hz prf	2	3-20	5

Tabla 2.1c

Principales tipos de láser: semiconductor

Medio	Principales longitudes de onda	Salida	Modo	Eficiencia típica %	Diámetro de haz típico
GaAlAs	750-905 nm	1-40mW	oc	hasta 20%	10° x 30°
InGaAsP	1.1-1.6 nm	1-10 mW	oc	hasta 20%	10° x 30°
Arreglos acoplados en fase	790-850 nm	100 mW-1 W 1 W – 10 W	oc	20-40%	10° x 30°

Tabla 2.1d

Principales tipos de láser: excimer

Medio	Principales longitudes de onda	Salida	Modo	Eficiencia típica %	Diámetro de haz típico (mm)	Divergencia típica (mrad)
Argón Fluoruro	193	50 W	5-25 ns pulsos hasta 1kHz prf	hasta 1%	2 x 4 a 25 x 30	2-6 mrad
Kriptón Fluoruro	248	100W	2 - 50 ns pulsos hasta 500 kHz	hasta 2%	2 x 4 a 25 x 30	
Xenón Fluoruro	351	30 W	1 - 30 ns pulsos hasta 500 kHz	hasta 2%	2 x 4 a 25 x 30	

Tabla 2.1e

Principales tipos de láser: coloreados

Medio	Principales longitudes de onda	Salida	Modo	Eficiencia típica %	Diámetro de haz típico (mm)	Divergencia típica (mrad)
Bombeado con lámpara estroboscópica	340-940 nm ajustable	Hasta 50W promedio	200 ns – 4 μs pulsos hasta 50 Hz	hasta 1	5 -20	0.5 – 5
Bombeado con láser de iones	400 – 1000 nm ajustable	hasta 2W	oc	5-25	0.6 - 1	1-2
Bombeado con láser por pulsos	300 – 1000 nm ajustable	Hasta 15W promedio	3 – 50 ns pulsos hasta 10 kHz	Depende de la luz de bombeo	2-10	0.36

2.5.2 Propiedades del Láser

Para poder comparar los sistemas de láser comunes es pertinente presentar aquí las principales propiedades y parámetros de los láser y de la luz láser.

Potencia Radiante (Flujo)

Una de las características más importantes es su capacidad para proporcionar alta potencia radiante en modo de pulsos o continuo. La potencia por pulsos varía desde unos cuantos watts producidos por láser semiconductores hasta aproximadamente 10^{18} watts proporcionados por láser de estado sólido en sistemas de fusión láser. La potencia óptica continua varía desde unos cuantos mW en el láser de HeNe hasta varios kW proporcionados por láser de CO₂.

Debido a que, los haces láser tienden a entregar su alto flujo de salida en un haz direccional bastante estrecho, algunas veces es apropiado analizar la salida en términos de la *irradiancia*, o flujo por unidad de área incidente sobre una superficie.

La irradiancia en la superficie está dada por:

$E = \text{potencia incidente} / \text{área superficial irradiada}$

$E = \Phi/A$

Coherencia

Una de las características más extraordinarias de los láser gaseosos es la emisión de un lápiz estrecho de luz cintilante que se utiliza para producir efectos vistosos en espectáculos a base de luz láser.

El alto grado de paralelismo, direccionalidad y monocromaticidad se observa en alguna medida en todos los láser y está relacionado con la *coherencia* del haz. Es posible identificar dos tipos de coherencia: la *temporal*, que define la constancia de fase del haz entre dos instantes dados en el tiempo y la *espacial*, que define la constancia de fase del

haz entre dos puntos a través del frente de ondas. Los parámetros mencionados se modifican a su vez por el diseño de la cavidad óptica y por la estructura de energía del medio láser.

Longitud de Coherencia

Para fines prácticos, la coherencia temporal se describe mejor en términos de la *longitud de coherencia* del láser. Si la salida de una haz láser se divide en dos partes y se recombina luego de haber recorrido dos trayectorias diferentes de igual longitud, los dos haces *interferirán*, formando un patrón de interferencia en el punto de la recombinación.

Al cambiar la longitud de la trayectoria de un haz con respecto a otra se reduce la visibilidad del patrón de interferencias en el punto, cuando las longitudes de las trayectorias difieran por $\pm l_c$, ya no habrá interferencia. El parámetro l_c define la longitud de coherencia del láser.

La longitud de coherencia está relacionada con la monocromaticidad o ancho de línea del haz según la expresión:

$$l_c = c/\Delta f$$

Mientras más estrecho sea el ancho de línea mayor será el grado de coherencia.

El ancho de línea también está relacionado con el número de modos longitudinales que es posible mantener en una cavidad óptica. Al restringir el láser de forma que opere en un modo longitudinal único es posible reducir su ancho de línea y por tanto incrementar su longitud de coherencia. Los anchos de línea para los láser de operación en modos múltiples suelen ser de decenas de GHz, con lo que se obtienen longitudes de coherencia de unos cuantos milímetros. Al operar en un modo longitudinal único, los anchos de línea se reducen a unos cuantos cientos de MHz, originando longitudes de coherencia de unos metros.

Divergencia del Haz

La coherencia espacial de un haz láser se define por medio del número de modos cavidad transversal que puede permitir la cavidad, la que a su vez está relacionada con la dispersión angular o *divergencia* del haz a medida que abandona la cavidad. La dispersión angular se debe a la difracción, o curvatura, experimentada por la luz a medida que pasa por una abertura. La divergencia $\Delta\theta$ del haz o la cantidad por la cual se incrementa el diámetro del haz a través de una distancia dada es mínima para los modos de orden más bajo. Por consiguiente, un láser que oscila en el modo fundamental EMT₀ exhibirá máxima coherencia espacial y mínima divergencia. La divergencia suele medirse en radianes. Por ejemplo una divergencia de 1 mR corresponde a un incremento de 1mm en el diámetro a lo largo de 1m de recorrido. La divergencia es mínima para los láser gaseosos a aproximadamente 0.5 mR que se incrementan hasta los láser de estado sólido aproximadamente de los 5 mR hasta los 20 mR o algo similar para los láser semiconductores.

Con la divergencia también se relaciona la capacidad de enfocar un haz láser a un pequeño tamaño de punto. El diámetro d al que es posible enfocar un haz láser mediante una lente de distancia focal f suele expresarse como:

$$d=2f\Delta\theta$$

Por consiguiente, los menores tamaños de punto se obtienen para los láser que operan en el modo fundamental EMT₀.

III. CABLES DE FIBRA ÓPTICA

El cable óptico tiene la única misión de guiar en su interior las fibras ópticas.

Por tanto, todos los elementos estructurales que le conforman están proyectados única y exclusivamente para proporcionar la adecuada protección mecánica a las fibras que aloja en su interior en función de las prestaciones que durante su vida útil se le exigirán.

Las dos características mecánicas primordiales y que, por tanto, constituyen parámetros fundamentales de diseño, desde el punto de vista de las fibras ópticas, en la fabricación de los cables ópticos son las siguientes:

- Resistencia mecánica de la fibra óptica.
- Fatiga estática o envejecimiento de las fibras ópticas.

3.1 ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS CABLES DE FIBRA ÓPTICA

Se definen los elementos estructurales de un cable óptico como el conjunto de todos los elementos aislados que conforman un cable de fibra óptica, junto con la sinergia existente entre los materiales específicos y las técnicas constructivas empleadas en la fabricación de los cables de fibra óptica a efectos de mantener a la misma dentro de unos márgenes de variación mecánica preestablecidos frente a las agresiones ambientales que pueda sufrir.

Los elementos estructurales que conforman un cable de fibra óptica son:

- Fibras ópticas.
- Protecciones secundarias.
- Sustancias de relleno.
- Cubiertas de protección.
- Alma del cable.
- Elementos de tracción del cable.
- Elementos de relleno.
- Elementos de armado.

Existen dos técnicas para la fabricación de la protección secundaria de las fibras ópticas:

- Estructura ajustada (Tigh).
- Estructura holgada (Loose).

3.1.1 Estructura Ajustada

Esta técnica consiste en aplicar una cubierta inicial de material termoplástico directamente sobre el recubrimiento primario de la fibra óptica, que recibe el nombre de protección secundaria o recubrimiento secundario.

El espesor aproximado del recubrimiento secundario es de 300 micras, con valores de diámetro externo que oscilan desde las 850 micras a las 900 micras.

El material termoplástico que se utiliza habitualmente para la confección del recubrimiento secundario es nylon o tefzel por su característica común de presentar un valor muy bajo del coeficiente de rozamiento.

Este tipo de estructura, se utiliza para la fabricación de cables flexibles y de pequeño diámetro muy apropiados para uso interior.

No son apropiados para resistir esfuerzos de tracción, si bien son muy ligeros y flexibles.

La norma DIN VDE 0888 Sección 2 especifica que la resistencia mínima a la tracción en toda su longitud que ha de soportar un conductor de fibra óptica, durante 1 sg, será de 5 N.

3.1.2 Estructura Holgada

Esta técnica consiste en crear una estructura holgada en el interior de la cual se alojan las fibras ópticas con protección primaria, recibe la denominación de Estructura Holgada o Protección Holgada y constituye la protección secundaria de las fibras ópticas guiadas.

La estructura holgada se logra construyendo un tubo o macarrón de plástico flexible, que se caracteriza por presentar un valor muy bajo del coeficiente de rozamiento interno, muy resistente a la deformación, al envejecimiento y a la degradación, lo que garantiza la estanqueidad a la par que una flexibilidad, elasticidad y rigidez mecánica en la misma estructura.

Las protecciones holgadas son tubos estancos que presentan por su cara interior y exterior una textura uniforme y libre de cualquier irregularidad, geométricamente regular y lisa, con brillo y tonalidad uniformes, tintadas con colores intensos para facilitar su identificación.

3.1.3 Sustancias de Relleno

Se emplean para garantizar la hermeticidad longitudinal del cable óptico e impedir que alguna rotura o fisura puntual del mismo provoque una pérdida de estanqueidad en su interior.

Las dos zonas donde se utilizan sustancias de relleno, son: *protección secundaria e intersticios del cable*.

Protección Secundaria

Esta es una de las zonas del cable que se ha de mantener siempre estanca, pues la pérdida de su hermeticidad permitiría la condensación de la humedad y la penetración de agua en su interior que podría llegar a congelarse con su natural aumento de volumen y que provocaría un aumento de la presión ejercida puntualmente sobre el conductor de fibra óptica.

La estanqueidad de la estructura holgada se logra rellenando ésta con una sustancia hidrófuga o masa tixotrópica, basada en el aceite de parafina químicamente neutra, que en el margen de temperaturas comprendido desde -30 °C hasta +70 °C mantiene constante su grado de viscosidad por lo que ni se congela ni escurre fuera de la estructura holgada.

No es una sustancia inflamable; es de una relativamente fácil limpieza, no ataca a la fibra óptica y no produce alteración alguna en sus propiedades características.

Intersticios del Cable.

Como los cables están confeccionados por elementos de sección circular, sobre los cuales se arrollan sucesivas capas concéntricas, en su interior quedan resquicios que es necesario rellenar para garantizar la estanqueidad del cable de fibra óptica.

Estos intersticios se rellenan con una masa (petrolato) que no afecta a las características de los elementos que conforman las cubiertas del cable, si bien tiene un pequeño efecto expansivo sobre las cubiertas dado que se aplica bajo alta presión 1,5 kg/cm² en el interior del cable óptico garantizando así su estanqueidad.

3.1.4 Cubiertas de Protección

Las cubiertas de protección tienen la misión de proteger al núcleo óptico del cable, a las fibras ópticas, de todos los esfuerzos mecánicos preservándolas de los cambios térmicos del exterior así como de los ataques químicos que se producen en los cables enterrados en función del pH del terreno y de la acción de la humedad sobre ellos.

Las cubiertas que se utilizan en la confección de los cables ópticos y que garantizan la protección de las fibras ópticas son:

Cubierta de Polietileno

El polietileno P.E. se caracteriza por su baja constante dieléctrica y la estabilidad de la misma ante variaciones de la temperatura lo que le hace idóneo para su uso en planta exterior. Su color es siempre negro.

En función de la densidad del mismo, podemos distinguir tres tipos:

- L.D.P.E. o polietileno de baja densidad.
- M.D.P.E. o polietileno de mediana densidad.
- H.D.P.E. o polietileno de alta densidad.

Cubierta de P V C

El P.V.C. o cloruro de polivinilo se utiliza habitualmente en los cables de uso interior, tiene un buen comportamiento ante agentes químicos; su utilización está especialmente indicada en planta exterior cuando el terreno presenta sustancias muy agresivas o inflamables tales como derivados del petróleo, al ser las cubiertas fabricadas con este material ininflamables. Su color es siempre gris.

Cubiertas de Plásticos Fluorados

Los plásticos fluorados P.F.A. y F.E.P. se utilizan en la confección de cubiertas sometidas a condiciones extremas de temperatura superiores a los + 100 °C.

Presentan una textura elástica y algo viscosa al tacto, con una baja constante dieléctrica y muy buen comportamiento ante agentes químicos.

Cubierta con Compuestos Libres de Halógenos

Estas cubiertas se construyen con vinilacetato de etileno, poseen las mismas características mecánicas de las cubiertas de polietileno y, a diferencia de éstas, se encuentran libres de halógenos.

Además de ser ininflamables, por los materiales empleados en su fabricación, tienen la propiedad de ser autoextinguibles en caso de llegar a producirse llamas.

Son de color gris y se les reconoce fácilmente por llevar impresa en su superficie las siglas F.R.N.C. Flame Retardant Non Corrosive.

3.1.5 Cubiertas

Las cubiertas especificadas para los cables de fibras ópticas son las siguientes:

- Cubierta PKP - Polietileno – Fibras de Aramida – Polietileno.
- Cubierta PEAP - Polietileno – Estanca Aluminio – Polietileno.
- Cubierta PESP - Polietileno – Estanca Acero – Polietileno.
- Cubierta PKESP - Polietileno – Fibras de Aramida – Estanca Acero - Polietileno.
- Cubierta PUKPU - Polietileno – Fibras de Aramida – Poliuretano.

3.1.6 Alma del Cable

Se denomina como alma del cable al núcleo del mismo, es la parte central en el interior del cable óptico, cumple la función de conectar los diversos elementos constructivos que le conforman y está recubierto de una cubierta de polietileno para mantener constante el radio de trenzado.

También recibe el nombre de núcleo óptico y está formado por un elemento central o fiador, las protecciones holgadas, los elementos de relleno y los elementos de sellado.

3.1.7 Elementos de Tracción del Cable

Se definen como elementos de tracción del cable óptico aquéllos que soportan las cargas debidas a los esfuerzos y solicitaciones mecánicas del cable.

Podemos considerar como elementos de tracción del cable las cubiertas o armaduras adicionales que se utilizan para la protección del alma del cable en los casos en que éstos están sometidos a condiciones extremas de presión, como es el caso de los cables

submarinos o ante frecuentes aplastamientos como es el caso de los cables usados en minería, y que están confeccionadas por armaduras de acero.

Como materiales que se han impuesto para soportar los esfuerzos de tracción figuran las fibras de compuestos aramídicos, kevlar y los cables trenzados de acero.

3.1.8 Elementos de Relleno

Los elementos de relleno, se utilizan en el caso de ser necesarios, para conformar el *alma del cable o núcleo óptico* del mismo y lograr que el cable alcance el máximo grado de circularidad posible.

Los elementos de relleno se disponen, junto con las protecciones secundarias, sobre la superficie del elemento central conformando el alma del cable.

3.1.9 Elementos de Armado

Los elementos de armado que conforman la construcción de los cables compuestos tierra-ópticos O.P.G.W son conductores de acero y conductores aleados arrollados en capas concéntricas o niveles de armado sobre el núcleo óptico del cable.

Los elementos de armado, los niveles de armado y las aleaciones de los conductores que se utilizan en las mismas, son variables en función de los requerimientos específicos de utilización del cable compuesto tierra-óptico.

Un factor determinante en los cables compuestos tierra-ópticos es el valor de peso por metro que los mismos presentan, en dependencia directa de los materiales utilizados en los elementos de armado, ya que en diseños actuales, se buscan bajos valores de peso por metro para descargar de esfuerzos mecánicos a las torres de distribución que soportan a los cables O.P.G.W a la par que se minimizan los efectos de las vibraciones originadas en los mismos por los efectos ambientales.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CABLES SEGÚN EL NÚMERO DE FIBRAS ÓPTICAS

3.2.1 Cables Monofibra

Estos cables constan de una sola fibra óptica y están confeccionados conforme la técnica de la estructura ajustada.

El revestimiento de la fibra óptica está formado por una capa de acrilato o por una capa múltiple de silicona, en ambos casos con un diámetro exterior máximo de 125 micras.

El recubrimiento primario está formado por una capa de acrilato, con un diámetro exterior máximo de 250 micras $\pm 10\%$, seguida de una capa de silicona con un espesor de 75 micras $\pm 10\%$.

La protección secundaria o revestimiento secundario está formada por acrilato, con un diámetro exterior máximo de 500 micras $\pm 10\%$.

3.2.2 Cables Bifibra

Estos cables constan de dos fibras ópticas y están confeccionados conforme la técnica de la estructura ajustada.

El revestimiento de la fibra óptica está formado por una capa de acrilato o por una capa múltiple de silicona, en ambos casos con un diámetro exterior máximo de 125 micras.

El recubrimiento primario está formado por una capa de acrilato, con un diámetro exterior máximo de 250 micras $\pm 10\%$, seguida de una capa de silicona con un espesor de 75 micras $\pm 10\%$.

La primera protección secundaria o revestimiento secundario está formada por acrilato, con un diámetro exterior máximo de 500 micras $\pm 10\%$.

El recubrimiento de la protección secundaria o segunda protección secundaria está confeccionada también conforme la técnica de la estructura ajustada.

3.2.3 Cables Multifibra

Estos cables constan de un número variable de fibras ópticas y están confeccionados conforme la técnica de la estructura ajustada.

El número de fibras ópticas del cable es variable en función del número de las protecciones holgadas del mismo.

El revestimiento de la fibra óptica está formado por una capa de acrilato o por una capa múltiple de silicona, en ambos casos con un diámetro exterior máximo de 125 micras.

El recubrimiento primario está formado por una capa de acrilato, con un diámetro exterior máximo de 250 micras $\pm 10\%$, seguida de una capa de silicona con un espesor de 75 micras $\pm 10\%$.

La protección holgada está formada por un tubo fabricado con un material plástico, poliamida o poliéster, y cuyos diámetros varían en función del número de fibras ópticas albergadas.

3.3 TIPOS DE CABLES ÓPTICOS PARA USOS ESPECIALES

3.3.1 Cables para Tendidos Subterráneos.

Los cables para tendidos subterráneos se utilizan canalizados en el interior de conductos, subconductos, instalados en galerías de servicio o directamente enterrados y realizan la función de comunicaciones ópticas.

Funcionalmente se trata de cables ópticos capaces de albergar en su interior al núcleo óptico que guía a las fibras ópticas que posibilitan las comunicaciones ópticas.

Desde el punto de vista constructivo hay dos tipos posibles de construcción: Totalmente Dieléctrica y con Armadura Metálica.

3.3.2 Cables Autoportantes

Los cables autoportantes se utilizan en tendidos aéreos, amarrados en postes o en las torres del tendido eléctrico y realizan la función de comunicaciones ópticas. Funcionalmente se trata de cables ópticos capaces de albergar en su interior al núcleo óptico que guía a las fibras ópticas.

Desde el punto de vista constructivo hay dos tipos posibles de construcción: Hilo fiador, generalmente de acero o figura en 8 y Totalmente Dieléctrica, esta última con variantes en cuanto a la utilización de varias o una sola estructura holgada.

3.3.3 Cables Compuestos Tierra-Ópticos

Los cables compuestos tierra-ópticos u O.P.G.W. (Optical Fiber Cable in Overhead Ground Wire) se utilizan en las líneas eléctricas aéreas de alta tensión y realizan simultáneamente las funciones de comunicaciones ópticas y cable de tierra o cable de fase.

Funcionalmente se trata de cables de tierra o de fase, capaces de albergar en su interior al núcleo óptico que guía las fibras ópticas posibilitando las comunicaciones ópticas.

Los cables compuestos tierra-ópticos se caracterizan por el valor del producto de la corriente de cortocircuito al cuadrado por el tiempo de duración del mismo: $(i_{cc})^2 t$, expresado en $(kA)^2 s$.

Desde el punto de vista constructivo hay dos tipos posibles de construcción: La tradicional basada en el núcleo macizo u holgado de aluminio y los diseños innovadores con regulación térmica en el caso de cortocircuito a tierra o sobreintensidad fortuita.

3.3.4 Cables Submarinos

Los cables submarinos se utilizan tendidos directamente sobre el lecho marino o enterrados en el mismo y realizan la función de comunicaciones ópticas.

Funcionalmente se trata de cables con varios niveles de armado capaces de albergar en su interior al núcleo óptico que guía las fibras ópticas, preservándole de las elevadas presiones en las profundidades marinas, salinidad, ataque de tiburones, etc.

3.4 CABLES

En las siguientes ilustraciones se pueden apreciar varios tipos de cables así como las diferentes características que los conforman. Se detallan características tales como número de cables, materiales, conformación, diámetros, entre otros. También se pueden observar algunos de los parámetros que hasta aquí se han descrito.



Figura 3.1. Construcción del núcleo óptico con una protección secundaria conforme la técnica de la estructura ajustada

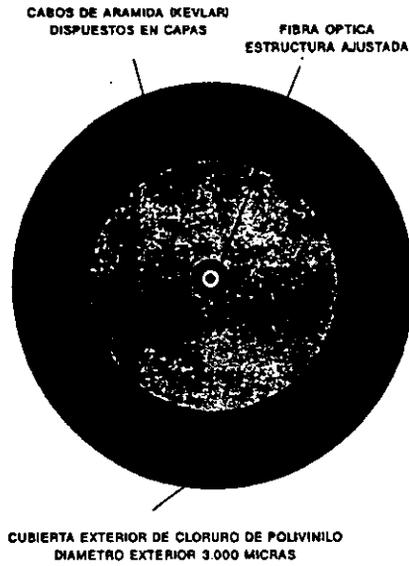


Figura 3.2. Sección de un cable óptico monofibra

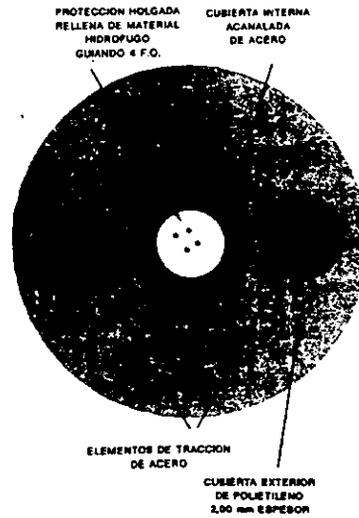


Figura 3.3. Sección de un cable óptico con cuatro fibras ópticas

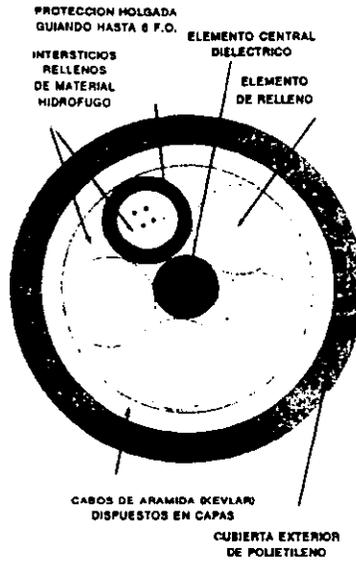


Figura 3.4. Sección de un cable óptico con cuatro fibras ópticas

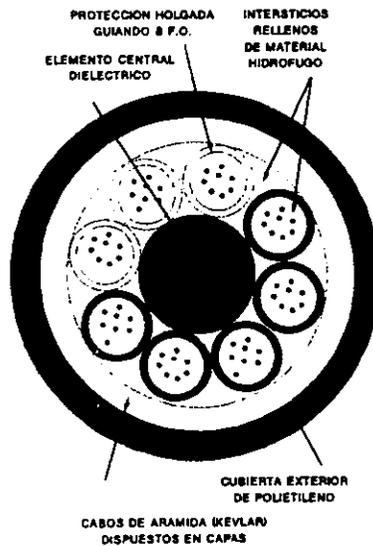


Figura 3.5. Sección de un cable óptico con 64 fibras ópticas

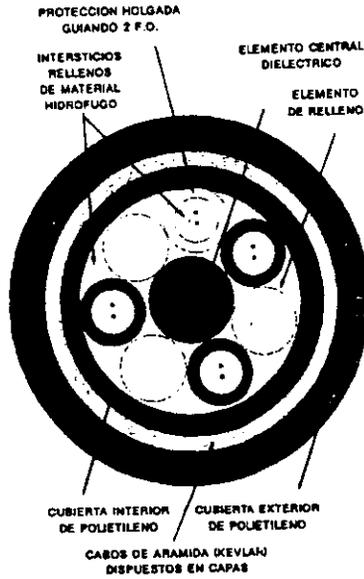


Figura 3.6. Sección de un cable óptico con ocho fibras ópticas con cubierta P.K.P

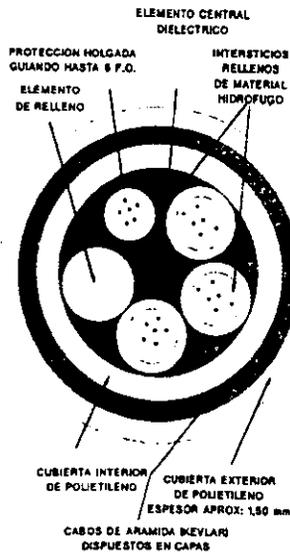


Figura 3.7. Sección de un cable óptico con 24 fibras ópticas con cubierta P.K.P

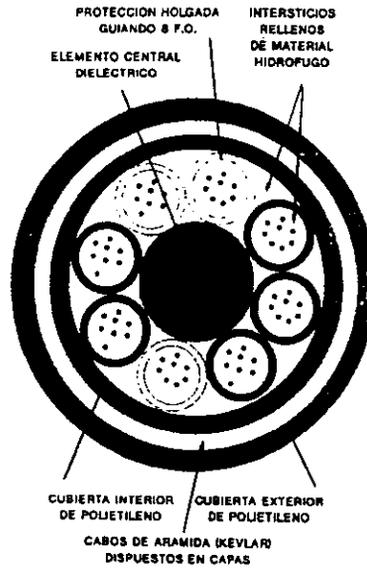


Figura 3.8 Sección de un cable óptico con 64 fibras ópticas con cubierta P.K.P

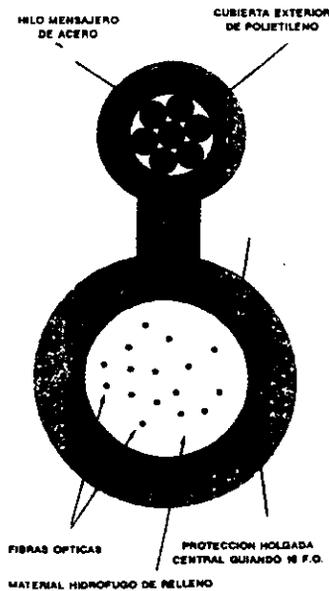


Figura 3.9. Sección de un cable óptico autoportante con 16 F's.O's (Figura en "8")

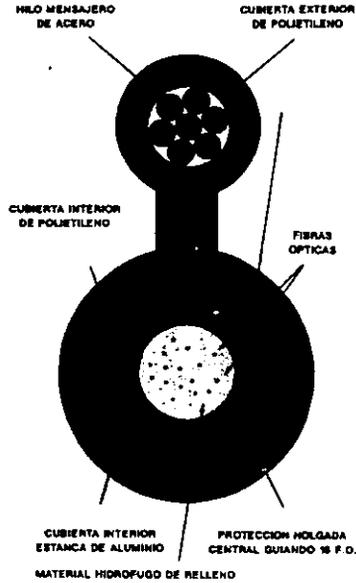


Figura 3.10. Sección de un cable óptico autoportante con 16 F's.O's (Fig. en "8")

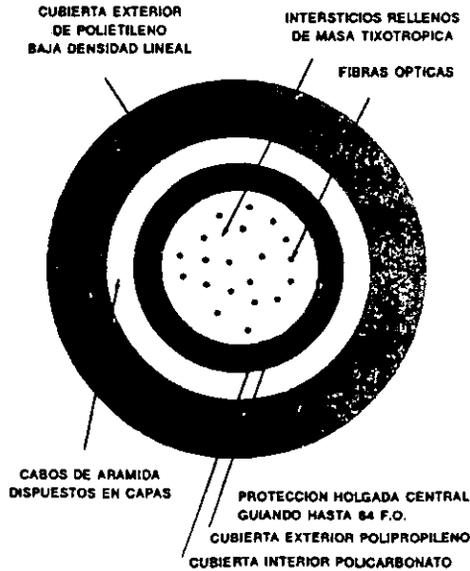


Figura 3.11. Sección de un cable óptico autoportante con 20 fibras ópticas.

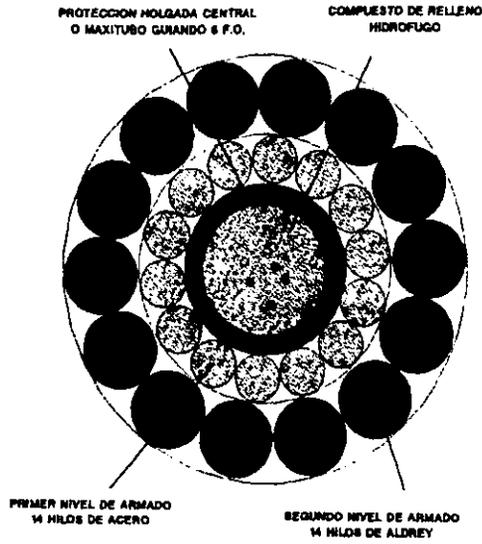


Figura 3.12. Sección de un cable compuesto tierra-óptico O.P.G.W tipo I con 6 fibras ópticas

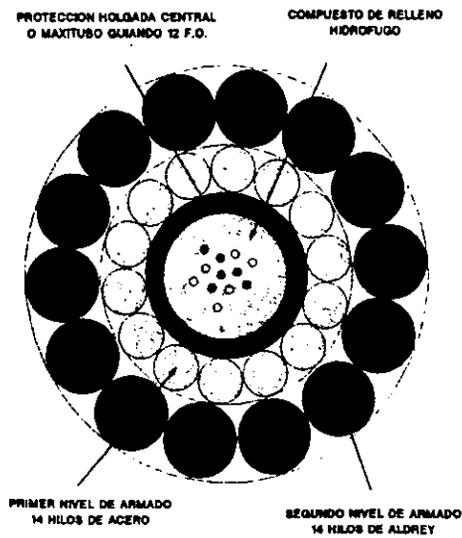


Figura 3.13. Sección de un cable compuesto tierra-óptico O.P.G.W tipo I con 12 fibras ópticas

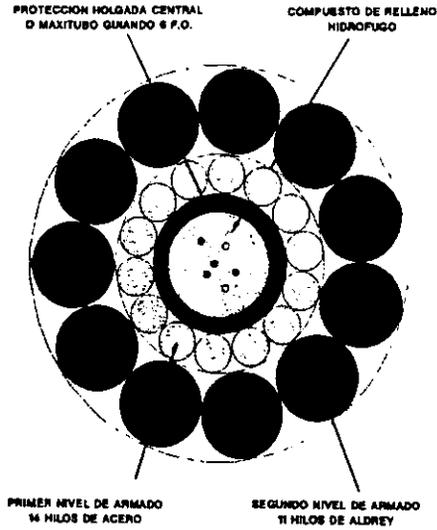


Figura 3.14. Sección de un cable compuesto tierra-óptico O.P.G.W tipo II con 6 fibras ópticas

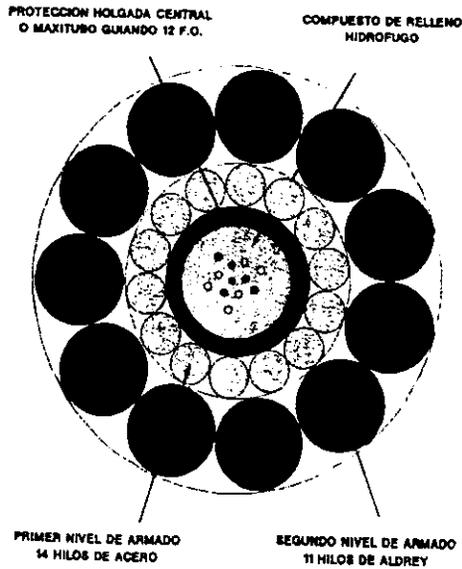


Figura 3.15. Sección de un cable compuesto tierra-óptico O.P.G.W tipo II con 12 fibras ópticas

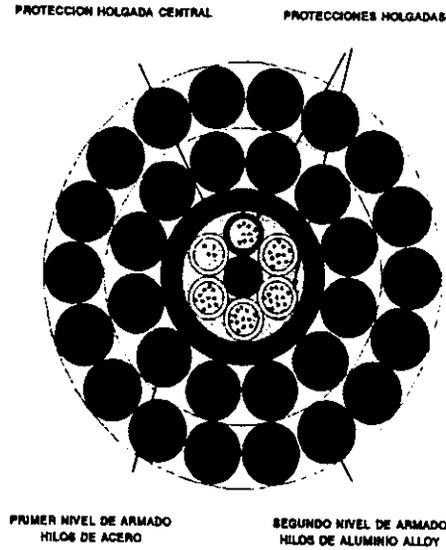


Figura 3.16. Sección de un cable compuesto tierra-óptico O.P.G.W con 64 fibras ópticas

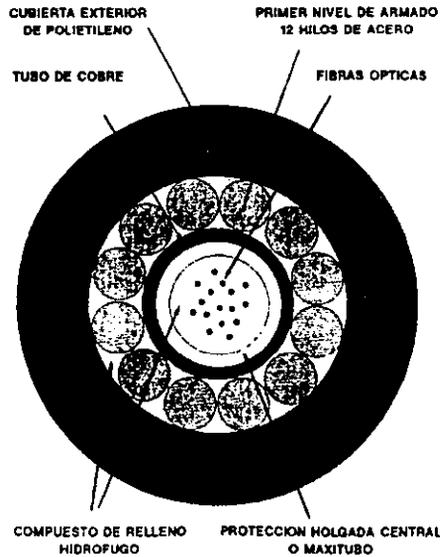


Figura 3.17. Sección de un cable óptico submarino

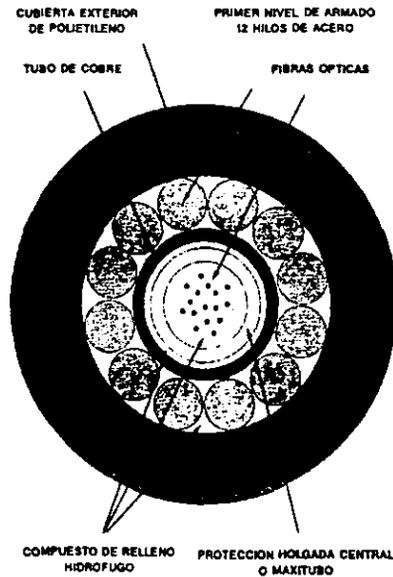


Figura 3.18 Sección de un cable óptico submarino mejorado

3.5 TENDIDO DE CABLES DE FIBRA ÓPTICA

En este apartado se pretende dar una visión general de los criterios básicos que hay que aplicar en los tendidos de cables de fibra óptica.

Es necesario comenzar dejando muy claro que los problemas derivados de una mala técnica de tendido son muy graves por lo que la aplicación de unos criterios básicos logrará minimizar estos problemas.

3.5.1 Requisitos que hay que cumplir

Los requisitos que habrá de cumplir un buen tendido de fibra óptica son los siguientes:

- Tender siempre la mayor longitud posible de cable entre empalmes con objeto de realizar el menor número de empalmes intermedios posibles, minimizando de esta forma la atenuación que éstos introducen a la par que se eliminan posibles puntos de falta de estanqueidad del cable.
- Utilización racional de las canalizaciones existentes mediante la inclusión de subconductos de tritubo, aun en el supuesto del tendido de un único cable por conducto. De esta forma se optimiza la futura ocupación de las canalizaciones y se racionaliza su uso.
- Utilización de las líneas aéreas de alta tensión como vías alternativas en zonas agrestes o de muy difícil acceso.
- Cumplimiento de los parámetros de tendido suministrados por el fabricante del cable y que son los siguientes:

-Radio de curvatura repetitivo del cable óptico.

-Radio de curvatura no repetitivo del cable óptico.

-Fuerza de tracción tolerable por el cable óptico.

- Utilización de herramientas y útiles especiales de tendido para cables de fibra óptica, como son los cabezales pasa-cables con compensación de torsión incorporada y los codos pasa-cables con rodillos, elementos que disminuyen considerablemente los esfuerzos de tracción que soportan los cables al eliminar los rozamientos y proporcionan un correcto guiado de los cables durante el tendido.

3.5.2 Métodos de Tendido

En este apartado se describen los distintos métodos de tendido de los cables de fibra óptica.

La elección del método usado está en función de los condicionantes del propio tendido.

Tan sólo se han de respetar los condicionantes impuestos por las características del cable óptico:

- Tensión de Trabajo.
- Tensión de Tendido.
- Radio de curvatura no repetitivo.
- Radio de curvatura repetitivo.
- Márgenes de temperatura de tendido.

En cada punto de empalme de un tramo de tendido con el siguiente es necesario dejar una reserva de cable necesaria para los trabajos ulteriores que habrá que realizar para conectar los cables y poder concatenar los tramos de tendido.

Los métodos de tendido conocidos son:

- Tendido en canalizaciones.

Se realiza manualmente o por medio de cabrestantes.

- Tendido en interior de zanja.

Se realiza desde un vehículo equipado para llevar la bobina de cable óptico. El cable se tiende sobre un lecho de arena fina y cribada para evitar cualquier aplastamiento del cable para, a continuación, ser señalizado con una malla señalizadora plástica de un color vivo que delate la presencia del cable en ulteriores excavaciones.

- Grapado en paredes.

Es el método utilizado habitualmente en las troncales de los edificios en los que se utilizan los cables ópticos para las redes de datos.

En utilizaciones especiales como es el caso de la minería se han llegado a tender tramos verticales o troncales de hasta 1000 metros de altura.

- Disparado en canalización.

Este método se utiliza en subconductos de alta densidad que son capaces de soportar una presión neumática sin fugas a lo largo de toda la longitud de tendido.

Los márgenes de variación del aire comprimido, oscilan entre 1 kg/cm² y 5 kg/cm², en función de la longitud del tramo tendido.

La estanqueidad se garantiza con un "tapón de arrastre" que es capaz de ejercer fuerzas de tracción de hasta 10000 N.

- Tendido en Líneas Aéreas de Alta Tensión.

La fibra óptica se utiliza por las compañías eléctricas en sus propios servicios de telefonía, telemando y telecontrol existen dos variantes en este tendido.

La primera consiste en utilizar los hilos de tierra o cables de guarda de las líneas de alta tensión y sobre ellos adosar un cable óptico dieléctrico.

Los métodos de amarre del cable son dos y ambos se realizan con máquinas especialmente diseñados para trabajar a gran altura y manejadas a distancia.

El primer método consiste en embridar cada cierta distancia, habitualmente 500 mm, el cable con unas bridas o abrazaderas especiales.

El segundo método consiste en arrollar sobre ambos cables un alambre continuo que les cose literalmente.

Ambos métodos son perfectamente válidos, el aumento de peso que suponen sobre las torres o postes es despreciable y permite la modernización de las redes a un coste exiguo.

La segunda variante consiste en utilizar los modernos cables compuestos tierra-ópticos u O.P.G.W., que incluyen en su interior las fibras ópticas.

- Tendido de cables submarinos.

Los cables para uso submarino se tienden directamente sobre el lecho marino, su

cubierta plástica exterior está reforzada por una armadura de acero, rellena de un material para garantizar la estanqueidad, al estar diseñados para soportar altísimas presiones del orden de 100 kN/cm^2 .

La tendencia actual es tender el cable óptico submarino en el interior de un protector que constituye una protección adicional para el mismo.

Dos cables ópticos de este tipo son los que se representan en las figuras 3.17 y 3.18.

El tendido de estos cables se realiza mediante buques cableros especiales.

IV. FUENTES DE RADIACIÓN ÓPTICA

4.1 ELECCIÓN DE LA FUENTE

En un sistema que utiliza una fibra óptica como canal de transmisión, la información se transmite por la luz que se propaga en la fibra. Esta información se puede transmitir en forma analógica o digital. En el primer caso, se modula la intensidad (cantidad) de luz que se inyecta a la fibra; es la modulación de amplitud. En la transmisión digital o numérica, la luz se emite en forma de pulsos de corta duración. Durante el estado “alto” del pulso, se inyecta luz a la fibra; mientras que en el estado “bajo”, no se inyecta luz puede ser transmitida de esta manera. Cualquiera que sea el sistema utilizado, se necesita una fuente luminosa. El sistema de comunicación es más eficiente cuanto mayor sea la cantidad de información que puede transmitirse a gran distancia.

El primer criterio que se considera para la elección de una fuente es la compatibilidad con la fibra.

Una fibra posee ciertas características propias. La luz debe inyectarse por la cara de entrada, que es un disco con una superficie extremadamente pequeña, inferior a $500\mu\text{m}$ en todos los casos. Además, sólo la luz contenida en el cono de admisión se propaga efectivamente en la fibra. La fibra tiene mínimo de atenuación para algunas longitudes de onda; estas ventanas de atenuación mínima están situadas aproximadamente entre 0.8 y $0.9\mu\text{m}$ para las fibras de vidrio compuestas, entre 1.1 y $1.3\mu\text{m}$ para las fibras de sílice de núcleo impurificado con P_2O_5 y alrededor de $1.55\mu\text{m}$ para las de sílice de núcleo impurificado con GeO_2 . La dispersión cromática en una fibra óptica es directamente proporcional a la longitud de onda espectral de la fuente y se puede minimizar utilizando una fuente de pequeña longitud espectral. Además, para las fibras de sílice, la dispersión cromática es mínima, alrededor de $1.3\mu\text{m}$. La dispersión modal es nula para fibras monomodo y una buena elección del perfil del índice permite reducirla para una fibra monomodo; esta dispersión es, sin embargo, mínima para longitudes de onda fijas.

Todas estas características de las fibras ópticas tienen influencia directa en la elección de la fuente de luz; esta fuente debe:

1. Tener una superficie emisiva pequeña y si es posible, inferior a la superficie de entrada de la fibra.
2. Emitir la luz en direcciones compatibles con el cono de admisión, o la apertura numérica de la fibra.

Estas dos condiciones son necesarias para poder inyectar en la fibra la mayor cantidad de luz de la fuente.

3. Emitir en longitudes de onda para que las fibras sean más transparentes, con el fin de recuperar la mayor cantidad posible de luz al final de la fibra.
4. Tener una longitud de onda espectral pequeña para minimizar la dispersión cromática.

Además de estos cuatro criterios basados en la compatibilidad entre la fuente y la fibra, la fuente debe:

5. Tener intensidad.
6. Tener un tiempo rápido de respuesta.
7. Poder modularse con facilidad.
8. Ser pequeña.
9. Ser económica.

Existen dos grandes categorías de fuentes luminosas: las incandescentes y las luminiscentes. Todo cuerpo que se calienta emite energía en forma de radiación. Es a lo que se le llama emisión del cuerpo negro o incandescencia. Las fuentes incandescentes – por ejemplo lámparas con filamento calentado – emiten un espectro continuo de longitudes de onda. Estas fuentes térmicas por naturaleza son muy lentas y no responden a los criterios 1,4,6,7. Las únicas fuentes utilizables son, por tanto, las luminiscentes. Entre

éstas, las más interesantes son las que utilizan la electroluminiscencia de los semiconductores. Los dos tipos de fuentes luminiscentes más utilizados son el diodo electroluminiscente (LED) y el láser semiconductor de inyección (LD). Actualmente se construyen estos dos tipos de fuentes de tal forma que cumplan con los nueve principales criterios enunciados. El LED satisface principalmente los criterios 1,3,7,8,9 mientras que el láser de inyección (LD) satisface sobre todo los criterios 1,2,3,4,5,6,7,8. La elección entre una fuente de LED o el láser de inyección (LD) se hace en función de la importancia de los criterios impuestos a un sistema de comunicación dado.

Entre las diferentes fuentes ópticas que existen, los diodos láser (LD) y los diodos emisores de luz (LED) *son los únicos* que satisfacen todos los requerimientos exigidos por los sistemas de telecomunicaciones. Actualmente, la instalación de sistemas de comunicaciones por fibras ópticas se ha difundido ampliamente debido principalmente a dos factores: enorme capacidad de transmitir información, y costo relativamente bajo. Estos logros han sido posibles gracias a los grandes avances tecnológicos: desarrollo de fibra de vidrio con bajas pérdidas y grandes anchos de banda; desarrollo de dispositivos ópticos de alta calidad y confiabilidad (fuentes ópticas – LED, LD, detectores ópticos – PIN y APD).

4.2 DIODOS EMISORES DE LUZ.

Los diodos emisores de luz (LED) son fuentes de luz con emisión espontánea (no coherente), son diodos semiconductores $p-n$ que para emitir luz se polarizan directamente.

Un semiconductor p tiene huecos libres en la banda de valencia y un semiconductor n tiene electrones libres en la banda de conducción, cuando el semiconductor p se une con el semiconductor n se forma una barrera de potencial como se presenta en la figura 4.1. En esta condición, los electrones no tienen suficiente energía para atravesar la barrera de potencial y llegar al semiconductor p para recombinarse con los huecos, tampoco los huecos tienen la suficiente energía para atravesar la barrera de potencial y llegar al

semiconductor n y recombinarse con electrones libres, por lo tanto no existe ningún movimiento de carga.

Si se aplica una polarización directa al diodo, la barrera de potencial disminuye elevando la energía potencial en el semiconductor n y disminuye la energía potencial en el semiconductor p .

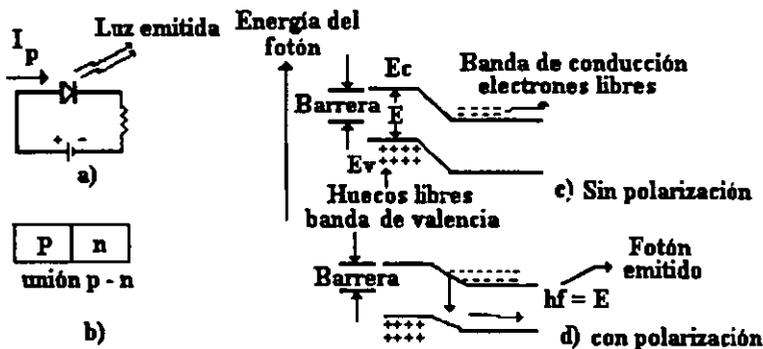


Figura 4.1. Símbolo y niveles de energía de una unión p-n

Bajo esta condición los electrones y huecos tienen suficiente energía para atravesar la barrera, los electrones pasarán de la banda de conducción a la banda de valencia recombinándose con los huecos, si el semiconductor es de transición directa, la energía perdida por los electrones se convertirá en energía óptica en forma de fotones.

Para la fabricación de diodos de alta eficiencia que acoplen suficiente energía es necesario que la recombinación electrón - hueco se realice en un área pequeña, y que los fotones emitidos se radien en una dirección preferida. Esto se logra confinando a los portadores de carga en un área pequeña con barreras de potencial y confinando a los fotones con perfiles adecuados de índices de refracción.

Lo anterior se logra con heterouniones, las cuales son uniones de semiconductores disímboles con diferentes niveles de energía y con índices de refracción diferentes.

Existen dos tipos de LED uno que emite la luz a través de la superficie de la zona activa y otro que emite a través de la sección transversal. La representación de un LED de superficie se representa en la figura 4.2.

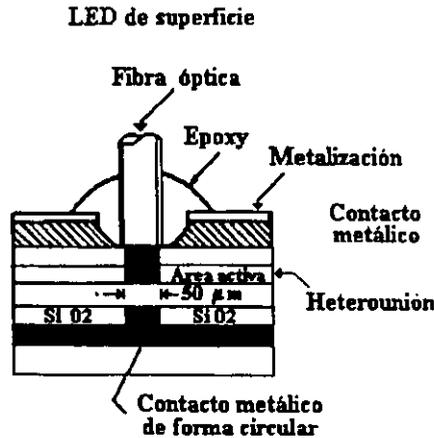


Figura 4.2. Estructura de un LED de superficie

En la figura 4.3 se representa la construcción de un LED de perfil.

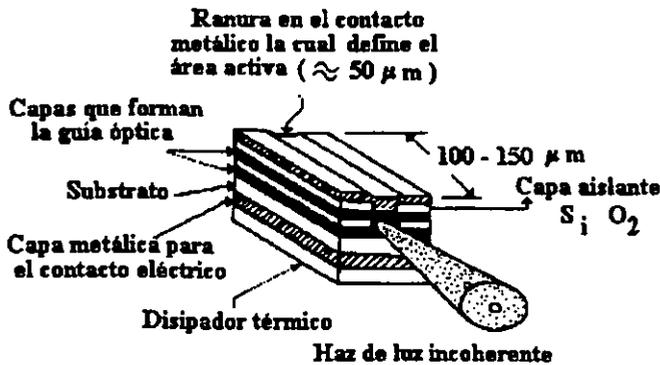


Fig. 4.3. Estructura de un LED de perfil

Un LED debe de tener una superficie emisiva A igual o inferior a la del núcleo de la fibra, si no una porción de la luz emitida no pasará a la fibra. Es necesario entonces, limitar la parte emisiva a una superficie pequeña; además, la luz emitida debe ser lo más compatible posible con el cono de admisión de la fibra. El LED debe emitir un flujo energético total lo más elevado posible.

La emisión de un LED de perfil es más direccional que la emisión de un LED de superficie.

La energía luminosa producida por los LED es proporcional al nivel de corriente de polarización del diodo. Por lo tanto, si el nivel de corriente de polarización varía en conformidad con una señal útil y la potencia emitida por el LED será proporcional a la amplitud de la señal.

Los LED son dispositivos muy robustos y no requieren de circuitería de protección, lo anterior redundando en simplicidad y bajo costo de los transmisores.

4.3 DIODOS LÁSER

Los láseres semiconductores (láser de inyección) son parecidos a otros láseres; son emisores de radiación coherente, es decir, monocromática (longitud espectral muy pequeña) y muy directiva. 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.

Los diodos láser (LD) son fuentes de emisión estimulada y contiene dos espejos semirreflejantes para formar una cavidad resonante, la cual sirve para realizar la retroalimentación óptica, así como elemento de selectividad.

La estructura de LD es muy similar a un LED. La diferencia fundamental consiste en que la emisión de un LD es siempre de perfil, y sobre éste, las superficies tienen características de espejos semirreflejantes.

Cuando el diodo se polariza directamente se *inyectan* portadores a la zona activa, donde se recombinan emitiendo espontáneamente fotones. Algunos de los electrones en la zona activa son estimulados al pasar a la banda de valencia, emitiendo otros fotones, cuya fase y frecuencia son idénticas con las fases y frecuencia de los fotones estimulantes.

Si la densidad de corriente es suficiente mente alta, existe un gran número de electrones que serán estimulados para que emigren al nivel de reposo emitiendo gran número de fotones, lo cual significa que se tienen altos niveles de ganancia óptica. Si existen espejos, los cuales realicen funciones de retroalimentación, la oscilación láser se alcanzará si el nivel de corriente es lo suficientemente grande, para que la ganancia óptica compense las pérdidas. Al nivel de corriente donde se alcanza el equilibrio entre pérdidas y ganancia se denomina corriente de umbral. Si el tamaño longitudinal de la cavidad resonante es varias veces más grande que la longitud de onda, se obtendrán varios modos longitudinales, y el espectro radiado contendrá estos modos longitudinales. Una representación de la estructura de un LD se ilustra en la fig. 4.4.

Los LD tienen una corriente de umbral y a niveles de corrientes menores a este umbral, el LD emite luz incoherente como un LED y a niveles de corriente arriba del umbral, la luz emitida es coherente. Puesto que las características de los espejos reflejantes son funciones tanto de la temperatura, como de la operación; la característica potencia óptica – corriente de polarización es función de la temperatura y sufre un cierto envejecimiento, debido a una operación normal o a degradaciones inducidas por una mala operación.

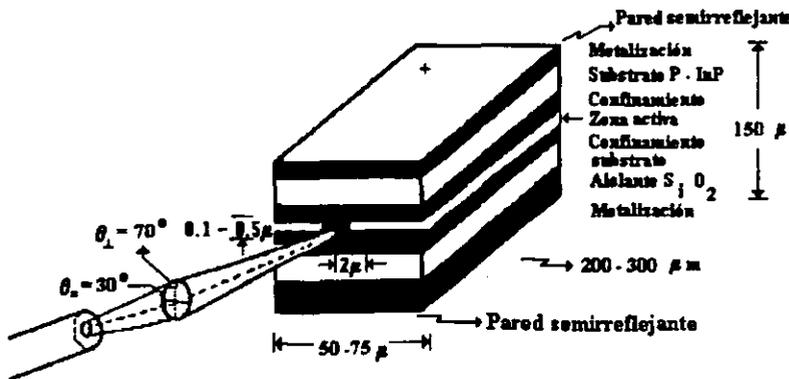


Figura. 4.4. Eestructura de un diodo láser

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES ÓPTICAS

Las fuentes de luz para telecomunicaciones vía fibras ópticas deben ser compatibles con la fibra: pequeñas, fáciles de modular a las velocidades utilizadas en los sistemas de comunicación y confiables. Dos tipos de fuentes de luz son compatibles para estas aplicaciones, los diodos emisores de luz (LED) y los diodos láser (LD). Estos dispositivos son diodos semiconductores que operan en polarización directa y emiten luz cuando los huecos y electrones se recombinan en la zona activa. La modulación se realiza variando la corriente de excitación de los diodos, para lo cual se utiliza un circuito que proporciona una corriente modulada de niveles altos (10mA –100mA). Estos tipos de fuentes de luz proporcionan suficiente potencia óptica (0.005 mW – 25 mW) para transmitir señales a través de las fibras ópticas a varios kilómetros. En aplicaciones ordinarias, la potencia de salida puede variarse con la corriente de operación para frecuencias de modulación de hasta varias centenas de MHz, sin necesidad de modulación adicional o externa.

Los LED generan luz por emisión espontánea, radiándola en todas direcciones, por lo que un porcentaje pequeño se acopla a la fibra óptica, normalmente del tipo multimodo. El LD tiene construida internamente una cavidad resonante tal, que cuando se excede la corriente de umbral se tiene una emisión estimulada, con gran amplificación de luz, que se genera con alta coherencia, la cual puede acoplarse dentro de una fibra multimodo o monomodo.

El LED con respecto al LD tiene mayor estabilidad térmica, mayor tiempo de vida, es más lineal, es menos susceptible a transitorios, es más robusto, más económico y requiere un circuito de excitación simple. Sin embargo, su emisión óptica es incoherente, por lo que puede acoplarse eficientemente a sólo a fibras multimodo. Puede modularse hasta 200 MHz dependiendo del nivel de contaminación de su material, el cual afecta al tiempo de vida de los portadores. El ancho de banda espectral es menor de 50 nm.

El LD con respecto al LED es mucho más rápido, su potencia de salida es mayor y su haz es coherente, por lo que acopla más potencia óptica a la fibra, su construcción es más compleja, su potencia óptica de salida depende fuertemente de la temperatura, es bastante

susceptible a transitorios, es más costoso y requiere de un circuito de excitación con compensación de temperatura, con compensación contra envejecimiento y de protección contra transitorios. Tienen una alta eficiencia de acoplamiento, puede modularse a velocidades altas (GHz) y su ancho espectral es menor de 5nm.

En general estas son las principales diferencias entre las fuentes aquí mostradas (LED y LD) y a continuación se presentan características más específicas.

Como se observó anteriormente dentro de los LED se distinguen dos clases de diodos electroluminiscentes:

- Los LED de superficie o diodos de emisión superficial.
- Los LED de perfil o diodos de emisión lateral.

Algunas de sus principales características son las siguientes:

Diodos de Emisión Superficial

Los LED de homounión emiten alrededor de los 0.9 μm . La potencia emitida por esos diodos está limitada por la fuerte absorción del GaAs en la longitud de onda de emisión y por una mala disipación térmica que limita la corriente. La excitación (flujo energético por unidad de superficie emisora) de estos diodos varía de 3 a 6 W/cm^2 . Para una superficie emisora de $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ (diámetro de $50\mu\text{m}$), el flujo energético emitido es del orden de una centena de mW. Para los LED de gran superficie emisora ($3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$), el flujo total emitido varía entre 1 y 2 mW. Los LED de homounión de emisión superficial tienen bandas de paso comprendidas entre 5 y 50 MHz.

Los LED de heterouniones emiten, por lo general, alrededor de 0.82 μm . La excitación de estos LED's de estructura inversa, tipo Burrus, o de domo hemisférico, varía de 30 a 150 W/cm^2 . El flujo energético total emitido es, por tanto, de 600 a 50 μW para diámetros de superficies emisoras que varían entre 50 y $200\mu\text{m}$. Las bandas de paso varían entre 5 y 50 MHz.

Diodos de Emisión Lateral

Son LED's construidos como los láseres de heterounión. Sin embargo, en estas estructuras no se alcanzan las corrientes de umbral necesarias para la producción del efecto láser.

Las longitudes de onda de emisión dependen de la naturaleza del material que constituye la unión. A menudo es de GaAlAs y las longitudes de onda de emisión están alrededor de los $0.85\mu\text{m}$.

El flujo energético total emitido varía entre 0.2 y 5 mW. Si se tienen en cuenta las dimensiones de la superficie emisora, los LED's de emisión lateral poseen excitaciones parecidas (150 W/cm^2) a las de los mejores LED's de heterouniones de emisión superficial (Burrus). Las bandas pasantes son también del mismo orden de magnitud (5 a 50 MHz).

La mayor ventaja de los diodos de emisión lateral reside en un diafragma de radiación más directivo.

Los LED's tiene duraciones de vida extremadamente largas ($> 10^5$ horas) y son, por ello, componentes confiables, que tienen características menos sensibles a las variaciones de temperatura que los láseres (LD).

Todos los LED's tienen un ancho de banda espectral entre 25 y 40 nm.

Láseres de Inyección (LD)

Todos los láseres de inyección (LD) están construidos por heteroestructuras. Las longitudes de onda de emisión dependen de la elección del material que constituye la zona activa. Las dos grandes categorías son:

- GaAlAs/GaAs para una emisión de aproximadamente $0.82\mu\text{m}$.
- GaInAsP/InP para una emisión entre 1.1 y $1.6\mu\text{m}$.

El flujo energético total emitido por estos láseres varía entre 5 y 30 mW. Las corrientes de umbral varían entre 50 y 150 mA y las bandas pasantes varían de 200 MHz a más de 1 GHz. El ancho de banda espectral es de 2 nm. Los tiempos de vida varían en función de la temperatura y son, por lo general más bajos que para los LED's.

Las principales dificultades provienen de la gran sensibilidad de estos láseres a las variaciones de temperatura.

V. DETECTORES DE RADIACIÓN ÓPTICA

5.1 ELECCIÓN DEL DETECTOR

Un sistema de telecomunicación óptica está compuesto por emisor, fibra óptica y detector. La luz emitida por la fuente de radiación (diodo electroluminiscente o diodo láser) se inyecta a un extremo de la fibra y se propaga; en el otro extremo de la fibra debe detectarse la luz: La detección consiste en transformar la luz en una señal eléctrica y es la función inversa a la emisión, que consiste en transformar la señal eléctrica en luz. Para elegir el tipo de detector que se utilizará, es necesario considerar las características de la luz que llega al extremo de la fibra.

En un sistema de comunicación óptica, se tiene ya sea una fibra muy larga de poca atenuación o una menos conveniente y, por tanto, de gran atenuación. Estos dos parámetros, longitud y atenuación, hacen que el flujo energético $P(t)$ al extremo de la fibra, sea mucho más pequeño que a la entrada. Además, por razones económicas, el emisor elegido no siempre es el que permite inyectar el máximo de luz en la fibra. El detector debe entonces ser capaz de proporcionar una señal eléctrica útil aun cuando reciba un flujo energético muy pequeño. La calidad fundamental del detector, por tanto, es su sensibilidad.

La luz que llega al detector posee una longitud de onda determinada por el espectro de emisión de la fuente. Las longitudes de onda utilizadas son principalmente aquellas que están alrededor de los $0.8 \mu\text{m}$. A estas longitudes de onda los LED y los láseres de inyección son eficientes y además, las fibras tienen poca atenuación.

El flujo energético $P(t)$ varía en forma muy rápida en el tiempo con el fin de transportar la mayor cantidad posible de información, por ello el detector debe ser lo suficientemente rápido para poder transformar el flujo energético que recibe sin alterar las variaciones en el tiempo.

Puesto que la luz procede de una fibra de diámetro muy pequeño, el detector debe tener dimensiones compatibles con las de la fibra con el fin de que el acoplamiento entre la luz y el detector sea eficiente.

Además de características como gran sensibilidad en el infrarrojo cercano, rapidez y dimensiones reducidas, el detector debe poseer las propiedades que hagan posible su utilización, es decir: de bajo costo e insensibilidad a los parámetros físicos del medio ambiente, en particular la temperatura.

Hay dos grandes categorías de detectores de radiación. La primera es la de los detectores térmicos. En éstos la radiación es absorbida y así se genera una elevación de temperatura, que provoca una variación sensible de un parámetro físico. El parámetro físico que varía con la temperatura puede ser: la resistencia eléctrica, la constante dieléctrica, el potencial de contacto, o el volumen de un gas. Pero su baja sensibilidad y sobre todo su poca rapidez, los vuelven inutilizables como detectores en el área de las telecomunicaciones ópticas.

La segunda categoría es la de los detectores cuánticos. En éstos, el fenómeno físico puesto en juego es la transferencia directa de energía de un fotón a un electrón en un sólido. Si esta energía ayuda al electrón a salir del sólido, se habla del efecto fotoeléctrico. Si la energía del fotón ayuda a que un electrón alcance la banda de conducción en un cristal semiconductor, se trata de fotoconducción. El efecto fotoeléctrico se utiliza en las celdas fotoeléctricas y en los fotomultiplicadores. Como es necesario que se haga el vacío para poder recuperar el electrón emitido por la superficie del sólido, las dimensiones de este tipo de detectores no se adaptan a las de una fibra óptica; además, el problema de la emisión fotoeléctrica para fotones de longitud de onda superior a $1 \mu\text{m}$ no se ha resuelto por completo. El fenómeno de fotoconducción en un semiconductor y su extensión al fotodiodo se adapta perfectamente al área de las fibras ópticas. La tecnología del detector cuántico es la misma de los semiconductores y es semejante a la de los LED o de los láseres de inyección, por lo que este es el género de detectores más utilizado.

El propósito del receptor en los sistemas de telecomunicaciones por fibras ópticas, es extraer la información contenida en una portadora óptica que incide en el fotodetector. En los sistemas de transmisión analógica el receptor debe amplificar la salida del fotodetector y después demodularla para obtener la información. En los sistemas de transmisión digital el receptor debe producir una secuencia de pulsos eléctricos (unos y ceros) que contienen la información del mensaje transmitido.

5.2 FOTODETECTORES

En los sistemas de telecomunicaciones por fibras ópticas, el fotodetector es un elemento esencial, su importancia impone que satisfaga requerimientos muy estrictos en su funcionamiento. Las características principales que deben tener son:

- 1.- Sensibilidad alta a la longitud de onda de operación.
- 2.- Contribución mínima al ruido total del receptor.
- 3.- Ancho de banda grande (respuesta rápida).
- 4.- Características estables respecto al medio ambiente.
- 5.- Dimensiones físicas compatibles con la fibra óptica.

Existen básicamente dos tipos de fotodetectores de semiconductor, que se emplean en los receptores ópticos para sistemas de telecomunicaciones. El primero es comúnmente referido como fotodetector PIN, éste genera un solo par electrón-hueco por fotón absorbido. El segundo se refiere como fotodetector de avalancha (APD), el cual presenta ganancia interna y genera más de un par electrón-hueco, debido al proceso de ionización de impacto, este proceso se llama ganancia de avalancha. En algunas aplicaciones, donde se requiere alta sensibilidad, es ventajoso diseñar los receptores con fotodetectores de avalancha; sin embargo, la propiedad aleatoria del proceso de multiplicación de ionización de impacto introduce ruido que puede en algunas circunstancias, llegar a ser un factor dominante en la sensibilidad del receptor. Además, dicho dispositivo requiere de altos voltajes de polarización para obtener ganancia, la cual depende de la temperatura.

5.3 FOTODETECTORES PIN

Los fotodetectores PIN, son los detectores más comunes en los sistemas de transmisión por fibras ópticas. Estos dispositivos se forman con una capa de material semiconductor ligeramente contaminado, que se le llama región intrínseca (i), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, una tipo *N* y otra tipo *P*. Cuando se le

aplica una polarización inversa al fotodetector, se crea una zona desértica (libre de portadores) en la región intrínseca (i), en la cual se forma un campo eléctrico. En la figura 5.1 a, se muestra la representación esquemática del fotodetector PIN con su circuito externo, la distribución del campo eléctrico en la zona desértica y un diagrama simplificado de los niveles de energía, se muestran en las figuras 5.1 b y 5.1 c, respectivamente.

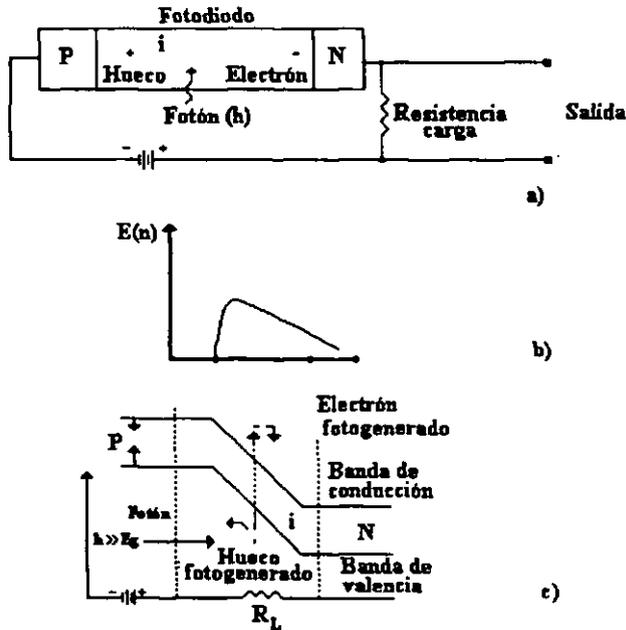


Fig. 5.1. Fotodetector PIN, a) Representación esquemática, b) Distribución del campo eléctrico, c) Niveles de energía

Un fotón que llegue a la zona desértica, con energía mayor o igual a la del material semiconductor, puede perder su energía y excitar a un electrón que se encuentra en la banda de valencia, para que pase a la banda de conducción. Este proceso genera pares electrón-hueco, que se les llama fotoportadores. El fotodetector se diseña para que la mayoría de los fotones se absorban en la zona desértica y se generen fotoportadores, los cuales se separan debido al campo eléctrico presente en esta región. La colección de los

portadores genera un flujo de corriente en el circuito externo del fotodetector, a la cual se le conoce como *fotocorriente*.

La construcción de fotodetectores PIN típicos con anillo de protección, se realiza en obleas de silicio tipo P. En la superficie inferior de la oblea se hace una difusión P+, para facilitar el depósito de los contactos metálicos. En la superficie superior de la oblea se realiza una difusión N+ con la técnica de fotomascarilla, para asegurar la difusión del área activa y de los contactos. La estructura de un fotodetector de este tipo se muestra en la figura 5.2.

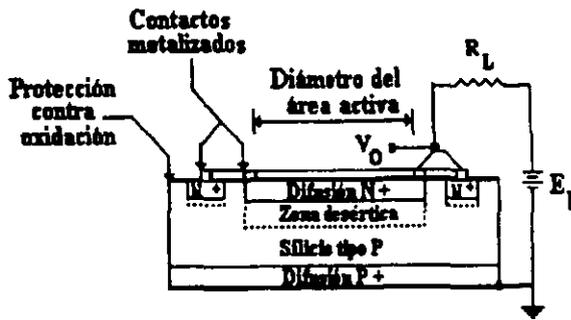


Figura 5.2. Estructura de un fotodetector PIN con anillo de protección.

En operación, el fotodetector PIN se comporta como una fuente de corriente que genera una fotocorriente, cuya expresión es:

$$I_p = P \frac{\eta q}{h\nu} = P \frac{\eta q \lambda}{hc} = PR \quad (\text{Ec. 5.1})$$

donde:

P es la potencia óptica incidente en el fotodetector;

η es la eficiencia cuántica del fotodetector;

q es la carga del electrón;

$h\nu$ es la energía del fotón;

$\nu = c / \lambda$ es la frecuencia de la luz;

c es la velocidad de la luz en el vacío;

λ es la longitud de onda;

$R = \eta q \lambda / hc$ es la responsividad del fotodetector.

Los fotodetectores se diseñan para que funcionen bajo ciertas condiciones de operación específicas. Sin embargo es posible usarlos fuera de las condiciones recomendadas en las hojas de datos, con el objetivo de optimizar su funcionamiento. Si el dispositivo se opera fuera del voltaje de polarización recomendado por el fabricante, se debe tener en mente que varias de las características ensilladas en las hojas de datos se modifican. Los parámetros principales que se afectan al variar el voltaje de polarización de los fotodetectores son:

- 1.- La capacitancia y resistencia de la zona desértica.
- 2.- La capacitancia y resistencia de la zona no desértica.
- 3.- La responsividad.
- 4.- El ruido (corriente de oscuridad).
- 5.- La velocidad de respuesta.

Los fotodetectores PIN que se fabrican GaAlAs/GaAs tienen corrientes de oscuridad de aproximadamente 0.2 nA y operan en el intervalo de las longitudes de onda de 700 – 900 nm. Los que se fabrican con GaInAs tienen una corriente de oscuridad de aproximadamente 2 nA y operan en las longitudes de onda de 1000 - 1550 nm. La capacitancia de este tipo de fotodetectores es de aproximadamente 0.1 pF, por lo que se utilizan en sistemas de alta velocidad.

Los fotodetectores de silicio, tienen una corriente de oscuridad alrededor de 1 nA, su capacitancia es de aproximadamente 2 pF, operan en el intervalo de longitudes de onda de 700 - 1000 nm y su eficiencia cuántica es alta.

Los fotodetectores de germanio operan en las longitudes de onda mayores de 1000 nm, en laboratorio se tienen de hasta 1800 nm, su corriente de oscuridad aumenta fuertemente con la temperatura, por lo que ofrecen una mayor sensibilidad cuando operan a temperaturas menores que 0°C.

5.4 FOTODETECTORES DE AVALANCHA

Cuando a un fotodetector se le aumenta el voltaje de polarización, llega un momento que la corriente crece incontrolablemente, por el fenómeno de avalancha, hasta la destrucción del dispositivo. La región a partir de la cual la corriente aumenta se llama de avalancha. Si en esta región el fenómeno de avalancha se controla, la sensibilidad del fotodetector se incrementa notablemente. Para esto, es fundamental que no se rebase la capacidad de disipación del dispositivo, por lo que es importante limitar la corriente para un determinado voltaje de polarización.

De acuerdo con esta idea hay fotodetectores que funcionan con altos voltajes de polarización (50 - 400 Volts). Cuando se aplican altos voltajes de polarización en la unión P-N (ver fig. 5.3) a través de la zona de transición aparece un campo eléctrico muy intenso. En esta región los portadores de carga libres (pares electrón-hueco) se desplazan más rápidamente, con mayor energía y liberan nuevos portadores secundarios, los cuales también son acelerados y capaces de producir nuevos portadores. Este efecto es acumulativo y recibe el nombre de multiplicación por avalancha, que se cuantifica por el parámetro denominado ganancia (M), que está dada por:

$$M = \frac{I_T}{I_P} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

donde:

I_T es la fotocorriente total;

I_P es la fotocorriente primaria;

V es el voltaje de polarización aplicado;

V_B es el voltaje de ruptura del dispositivo;

n es un coeficiente.

V_B y n dependen del material semiconductor y de las concentraciones de las impurezas empleadas en la fabricación del fotodetector.

De la ecuación 5.1 también se tiene que:

$$I_T = M I_p = M P (\eta q / h\nu) \quad (\text{Ec 5.3})$$

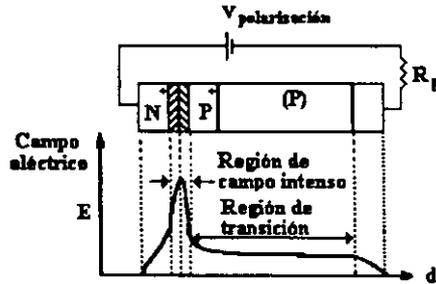


Figura 5.3. Fotodetector de avalancha

La ganancia depende del diseño del dispositivo y de las condiciones de polarización, por lo que es función del voltaje aplicado y de la temperatura de la unión.

VI. REPETIDORES

Los repetidores mostrados en la figura 5.4 se necesitan a intervalos regulares a lo largo de la línea de fibra para que la energía luminosa modulada no caiga debajo de un nivel detectable debido a las pérdidas. El repetidor consiste básicamente de un diodo PIN o un detector APD, un regenerador de pulso electrónico, y una fuente de luz LED o LD para mandar las señales de luz modulada hacia la siguiente sección de la línea de fibra.

Las transmisiones a distancias demasiado grandes pueden necesitar la utilización de uno o varios repetidores, cuya función es amplificar la señal óptica. Un repetidor está constituido por un receptor óptico seguido por un emisor óptico.

El emisor óptico contiene la fuente de luz, que puede ser un LED o un LD.

El receptor óptico contiene al detector óptico, el cual puede ser un fotodetector PIN o un fotodetector de avalancha.

El emisor y el receptor ópticos están dotados de conectores que permiten acoplar la fuente y el receptor a la luz de la fibra.

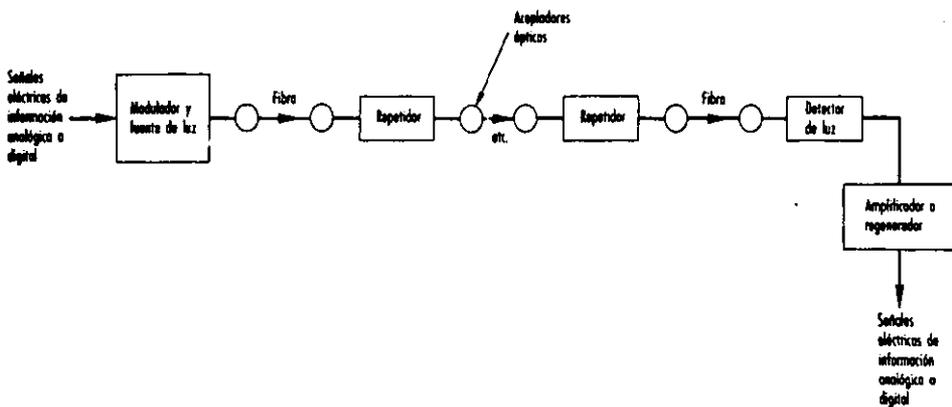


Figura 5.4. Sistema básico de telecomunicación unidireccional por fibra óptica

VII. CONECTORES Y EMPALMES

Las fibras ópticas para conectarse tanto al receptor como al transmisor requieren de uniones removibles, éstas se logran por medio de conectores. Existe un conjunto de diferentes conectores tanto para fibra multimodo como para fibra monomodo.

Las atenuaciones típicas introducidas por diferentes conectores a las fibras multimodo (IG) y monomodo (MM) se ilustran en la tabla 7.1.

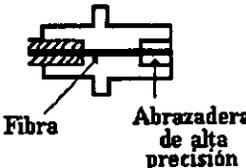
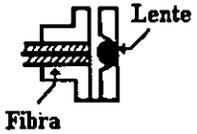
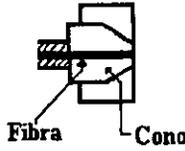
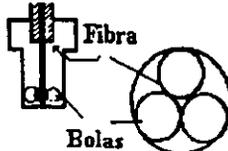
Conector	Tipo	Fibra	Pérdidas	Colocación
Abrazadera de alta Precisión		IG M	0.1 dB 0.3 dB	En el lugar
De lentes		IG	0.8 dB	Fábrica
Bicónico		IG M	0.2 dB 0.3 dB	En el lugar
Bolas		IG	0.7 dB	En el lugar

Tabla 7.1. Atenuaciones típicas introducidas por diferentes conectores

La unión permanente entre dos secciones de fibras ópticas (empalmes) se realiza por medio de diferentes técnicas: fusión o con adhesivo. También se emplean diferentes métodos para alinear las fibras: camisas, ranuras, varillas, etc. Una ilustración de las diferentes técnicas de realizar empalmes se ilustra en la figura 7.1.

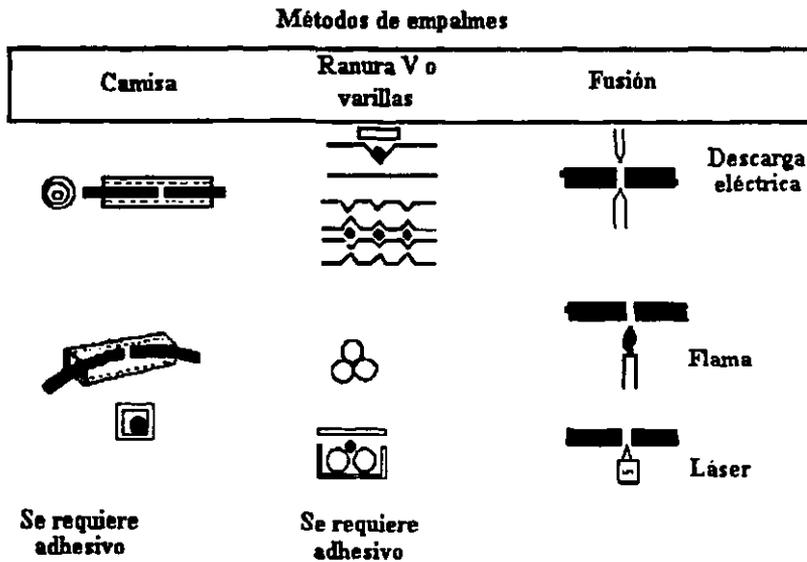


Figura 7.1. Diferentes técnicas de realizar empalmes, se ilustran en la figura 7.1.

Al realizar empalmes y conexiones se introducen atenuaciones causadas por diferentes factores: Desalineamiento de ejes, inclinación de ejes, inclinación de caras, diferencia del diámetro de los núcleos, diferencia entre los índices de refracción de los núcleos, entre otros. En un empalme o conexión pueden estar presentes uno o varios factores que introducen atenuación. Niveles típicos de atenuación introducida por los factores antes enunciados se presentan en la tabla 7.2.

Causas que introducen pérdidas	Empalme	Error	
		Monomodo	Gradual
Desalineamiento		$x = 2 \mu\text{m}$	$x = 2 \mu\text{m}$
		0.74 dB	0.06 dB
Inclinación de ejes		$\theta = 1^\circ$	$\theta = 1^\circ$
		0.46 dB	0.15 dB
Inclinación de las caras		$\theta = 1^\circ$	$\theta = 1^\circ$
		0.21 dB	0.03 dB
Diferencia de núcleos		$2a_1 = 10 \mu\text{m}$ $2a_2 = 8 \mu$	$2a_1 = 50 \mu\text{m}$ $2a_2 = 48 \mu\text{m}$
		0.02 dB	0.15 dB
Diferencia de índices		$\Delta_1 = 0.2\%$ $\Delta_2 = 0.25\%$	$\Delta_1 = 1.0\%$ $\Delta_2 = 0.8\%$
		0.03 dB	0.32 dB

Tabla 7.2. Atenuaciones típicas introducidas por desalineamiento, inclinación, diferencia de diámetros e índices de los núcleos.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

VIII. PLANIFICACIÓN DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA.

Los enlaces de fibra óptica están conformados por un tendido de fibra óptica y por los equipos ópticos de línea: transmisor receptor y regeneradores intermedios.

Los parámetros fundamentales de transmisión que hay que tener en cuenta en la planificación del enlace de fibra óptica son los siguientes:

- Atenuación global del enlace.
- Ancho de banda global del enlace.

Todos los cálculos y formulas que a continuación se describen y utilizan están orientados a la obtención de los dos parámetros fundamentales de diseño del enlace antes citados y constituyen la metodología que se seguirá en la planificación de un enlace de fibra óptica.

Existen otros factores que se deben tener en cuenta en la planificación y que son los siguientes:

- Vida útil del enlace.
- Envejecimiento de los equipos.
- Deriva térmica.

Estos tres factores obligan a trabajar con un margen de reserva capaz de garantizar el mantenimiento del enlace, dentro de los márgenes planificados, absorbiendo las inevitables atenuaciones adicionales que se introducirán durante la vida útil del mismo.

8.1 METODOLOGÍA DE LA PLANIFICACIÓN

Seguidamente se describen los pasos sucesivos que se seguirán durante la planificación de un enlace de fibra óptica:

- Medio físico del enlace.
- Planificación del tendido de fibra óptica.
- Cálculo del ancho de banda requerido por el sistema.
- Caracterización del transmisor.
- Caracterización del receptor.
- Análisis global de la viabilidad del enlace.

8.2 MEDIO FÍSICO DEL ENLACE

En los casos en los que sea posible el acceso al medio físico por el que discurre el enlace, se realizará un replanteo sobre el terreno para obtener el conocimiento exacto de todas las características del medio.

Cuando el acceso al medio no es posible como ocurre en el caso de los tendidos submarinos de cables ópticos es necesario el conocimiento exacto de toda una serie de factores inherentes al medio tales como corrientes submarinas, profundidad y presión, zonas de tiburones, orografía del lecho marino, etc.

8.2.1 Viabilidad y Configuración del Tendido

Inicialmente se buscará siempre la viabilidad del enlace óptico para, seguidamente y en función de las opciones disponibles, proceder a la configuración del tendido y a la elección del tipo de cable óptico conforme a la opción que se considere idónea.

Los criterios en base a los que se configura el tendido se adoptan siempre en función de una serie de condicionantes puntuales técnicos y económicos, prioridades e intereses.

Desde el punto de vista técnico se buscara aquella configuración que constituya la mejor solución en función del medio y que permita una mejor protección de los cables de fibra óptica, de los agentes medioambientales y de otros factores externos garantizando de esta forma la vida útil de las fibras ópticas y por ende del enlace.

8.2.2 Trazado del Tendido

El trazado del tendido depende de la configuración adoptada para él, siendo las posibles configuraciones en función del medio físico las siguientes:

- Configuración del tendido terrestre.
- Configuración del tendido submarino.
- Configuración del tendido aéreo.

Configuración del Tendido Terrestre.

En el caso de que la configuración del tendido sea terrestre ésta se adaptará a la topología y a las características geológicas y químicas del terreno.

En los tendidos terrestres el cable óptico puede tenderse canalizado, enterrado o en pared.

Siempre que sea posible se optará por el tendido canalizado en el interior de un subconducto y preferentemente, en caso de ser viable, el subconducto se guiará en el interior de una galería o en una canalización con conducto.

Si el tendido es directamente enterrado se elegirá el tipo de cable óptico que se considere óptimo con una construcción antiroedores.

Durante el tendido se respetará la profundidad de tendido normalizada para el cable óptico.

Se tenderá el cable óptico sobre un lecho de arena fina; seguidamente se le cubrirá con una capa de la misma hasta formar un prisma de arena sobre el que se colocará una malla señalizadora plástica de un color vivo que delatará la presencia del cable óptico en ulteriores excavaciones.

Durante el tendido se evitarán las pendientes y curvas pronunciadas, así como los cruces por caminos, calles, carreteras, gasoductos, oleoductos, colectores y ríos.

Por lo general se evitarán siempre las zonas húmedas que denotan la presencia de posibles manantiales o aguas superficiales y que constituyen una fuente inagotable de problemas.

En el caso de terrenos rocosos y sedimentarios se tenderá siempre el cable óptico en el interior de un subconducto y, a ser posible, canalizando el subconducto en el interior de un prisma de hormigón.

Es necesario conocer el tipo de terreno en el que se va a realizar el tendido a efectos de decidir la época del año idónea para el acceso a la zona de tendido de los vehículos pesados propios del tendido. Este condicionante podría llegar a modificar de forma inapelable el trazado del tendido e incluso imposibilitar la realización del mismo al impedir la maniobrabilidad de la maquinaria pesada necesaria para la realización del tendido de cable óptico.

Las características geológicas y químicas del terreno tales como humus, arcilloso, arenoso, petrolífero, con impurezas químicas etc. constituyen factores críticos en el momento de determinar el tipo de cubierta del cable óptico idónea en función del pH del terreno.

Configuración del Tendido Aéreo.

En el caso de que la configuración del tendido sea aérea, los dos tipos de cables que se utilizan en estas redes ópticas son:

- Cable compuesto tierra - óptico u O.P.G.W.
- Cable óptico autoportante.

En el caso específico de los cables ópticos tendidos en las redes de distribución y transporte de las compañías eléctricas entre las torres de alta tensión, la configuración del tendido viene impuesta por el trazado de la propia red de distribución o transporte.

La corriente de cortocircuito de la línea y el tiempo máximo de cortocircuito de la misma son dos factores críticos a efectos de calcular el calentamiento que soportarían las fibras ópticas guiadas en su interior y así poder escoger el tipo idóneo de cable compuesto tierra - óptico.

Por ejemplo la temperatura de la armadura del cable compuesto tierra - óptico con un diseño de vanguardia puede llegar a alcanzar valores de 160 °C para un tiempo de desconexión del cortocircuito a tierra de 1 segundo. Temperatura que en el caso de diseños más tradicionales pueden superar los 250 °C.

Los agentes medioambientales que presentan una mayor influencia en el caso de los tendidos aéreos realizados con este tipo de cables son: Incendios forestales, ambientes salinos, carga de hielo, zonas con caídas habituales de rayos y zonas ventosas.

En el caso de coincidir varios agentes medioambientales simultáneamente, como ocurre en el caso de zonas insulares con un ambiente fuertemente salino, el acero del cable óptico se degrada rápidamente hasta el extremo de que la vida útil de un cable óptico compuesto, en estas zonas, se reduce hasta tan solo diez años, por lo que es necesario someter al cable óptico a revisiones periódicas una vez pasados los cinco primeros años.

Los cables ópticos autoportantes, habitualmente dieléctricos, se tienden también en las redes de distribución y transporte de las compañías eléctricas entre las torres de alta tensión en las redes de comunicación de los ferrocarriles, por lo que la configuración del tendido viene siempre impuesta por el trazado de la red de distribución o de la red de comunicación de los ferrocarriles coincidente con el trazado viario de los mismos.

Cuando se tienden los cables ópticos autoportantes entre torres de alta tensión es necesario calcular de una forma muy cuidadosa la distancia a la que se realiza su tendido con respecto a los conductores de fase al objeto que se encuentren en zonas de potencial mínimo para minimizar de esta forma el efecto "Tracking" o de corrientes superficiales que se inducen en la cubierta de los cables ópticos autoportantes.

Este fenómeno se acentúa en las zonas altamente polucionadas, con precipitaciones frecuentes y en líneas de transporte con tensiones superiores a 100 kV.

Otro factor externo que influye es el tránsito del cable por zonas habituales de caza en las que es frecuente que el cable óptico sufra los impactos de los perdigones disparados por los cazadores.

Configuración del Tendido Submarino.

En el caso de que la configuración del tendido sea submarina, ésta se adaptará a la topología del fondo marino por lo que son necesarios estudios del perfil geológico y del perfil batimétrico del lecho marino.

El perfil geológico determina las características geológicas del lecho marino tales como bancos de arena, simas, cordilleras submarinas, zonas coralíferas, arrecifes, petrolífero etc.

El perfil batimétrico determina las características batimétricas y engloba dentro de su estudio tanto la variación de las profundidades marinas como la distribución de las diferentes especies marinas en sus diversas zonas.

El conocimiento del perfil batimétrico es crítico en el momento de determinar la ruta óptima de tendido del cable submarino y sus distancias en función de las profundidades idóneas. Permite también conocer y evitar las zonas de actividad pesquera específica de arrastre, así como las zonas pobladas habitualmente por tiburones, tradicionales enemigos de los cables ópticos submarinos.

Existe otra serie de factores, que sin llegar a ser críticos en la configuración de un tendido submarino, si es necesario tener en cuenta y que consisten en evitar la travesía del tendido por zonas muy específicas tales como: Zonas de prospecciones petrolíferas, zonas de actividades náuticas de recreo en las que habitualmente anclan yates, zonas de mareas y fuertes corrientes, zonas de actividad militar, zonas donde se encuentren tendidos antiguos cables submarinos en desuso, etc.

En el caso de que la configuración del tendido sea submarina los dos tipos de sistemas de cables submarinos que se pueden tender son los siguientes:

Sistemas U.S.S.

Los sistemas sin repetidores ópticos submarinos Unrepeated Submarine Systems, se caracterizan porque no existe equipo electrónico sumergido al encontrarse todos los equipos ópticos de línea en estaciones terrenas.

Son enlaces submarinos de corta distancia, hasta un máximo de 200 km y, por tanto, de baja o media profundidad no excediendo nunca los 4000 metros y que habitualmente enlazan zonas costeras entre sí o islas con el continente.

Estos sistemas presentan una serie de ventajas frente a sus homónimos intercontinentales, inherentes a sus características, entre las que cabe citar: Alta fiabilidad, relativamente bajos costes de tendido y de mantenimiento, rapidez en el tendido y facilidad de migrar a nuevas técnicas y velocidades de transmisión.

Todas estas ventajas se traducen en la gran rentabilidad que presentan estos sistemas, lo que les hace idóneos para ser acometidos en solitario por compañías o administraciones frente a los grandes enlaces intercontinentales que tan sólo pueden ser acometidos en base a decisiones políticas interestatales o por consorcios puntuales en los que interviene un elevado número de compañías o administraciones de telecomunicaciones.

Sistemas R.S.S

Los sistemas con repetidores ópticos submarinos Repeated Submarine Systems, se caracterizan porque sí existen equipos ópticos de línea sumergidos.

Son enlaces submarinos de una gran distancia en los que son habituales distancias de 9500 km y que pueden llegar en ocasiones, como es el caso del cable óptico submarino que enlaza Singapur con Marsella, a alcanzar distancias de 17800 km.

Son enlaces también de gran profundidad como consecuencia de las zonas que atraviesan y que pueden llegar a alcanzar profundidades del orden de 8000 metros y que lógicamente enlazan continentes entre sí.

Las desventajas de éstos sistemas son las inherentes a sus características específicas, que se contraponen a las de los U.S.S., entre las que cabe citar: Media fiabilidad, altísimos costes de tendido y de mantenimiento, lentitud en el tendido y dificultad ante la posibilidad de migrar a nuevas técnicas de transmisión.

8.2.3 Distancia del Enlace

Es necesario determinar la distancia real exacta que existe entre el transmisor y el receptor óptico desglosada por tramos de tendido y por secciones de regeneración previendo la viabilidad de las posibles rutas alternativas.

8.2.4 Ubicación de los Equipos

Es necesario conocer la ubicación exacta de cada equipo y, por tanto, las características técnicas que estos habrán de cumplir en función de los condicionantes ambientales a los que vayan a estar sometidos, tales como sus temperaturas de trabajo diurnas y nocturnas en el interior de un edificio, en una sala técnica, en el interior de manguitos de empalme, a la intemperie, la altura respecto al nivel del mar, el grado de humedad o el ambiente salino.

8.3 PLANIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN UN TENDIDO DE FIBRA ÓPTICA

La planificación de un tendido de fibra óptica desde el punto de vista técnico se basa en la determinación de los dos parámetros fundamentales de transmisión de las fibras ópticas utilizadas en el tendido y que son los siguientes:

- *Planificación de atenuaciones del tendido.*
- *Cálculo del ancho de banda del tendido.*

8.3.1 Planificación de Atenuaciones del Tendido

La atenuación total de un tendido de fibra óptica esta formada por la suma de las atenuaciones parciales de todos los elementos que intervienen en el mismo, expresadas en dB, siendo éstas las siguientes:

Atenuación Introducida por el Conductor de Fibra Óptica.

Se calcula mediante el producto del coeficiente de atenuación por unidad de longitud del cable de fibra, por la longitud real de cable que hay que tender.

Dependerá de la calidad de la fibra óptica y de la longitud de onda de trabajo de los equipos.

Atenuación Introducida por los Empalmes de Fusión.

Para enlaces con un pequeño número de empalmes se puede obtener un valor estimativo inicial válido de esta atenuación mediante el producto del número de empalmes por el valor de atenuación unitario estimado.

Para su cálculo se toma un valor medio de atenuación por empalme de 0.3 dB, que es un valor muy conservador.

En el caso de enlaces con una gran distancia de tendido y, por tanto, con un gran número de empalmes para el cálculo de la atenuación estimada introducida por los empalmes de fusión se introduce una nueva variable en el cálculo que es la desviación típica del valor medio de atenuación por empalme.

La desviación típica del valor medio de atenuación por empalme se utiliza para el cálculo de un nuevo factor que representa un margen de seguridad estadísticamente adoptado en cada empalme y que es función del valor de la citada desviación típica y del número de empalmes presentes en el tendido.

Este margen, expresado en dB, se suma al valor de atenuación inicialmente obtenido para la determinación del valor estimado de atenuación que introducen los empalmes de fusión mediante la siguiente expresión matemática.

$$\alpha_{\text{Total - Empalmes}} = N \left[\alpha_{\text{Media}} + 3 \left(\frac{\sigma_e}{\sqrt{N}} \right) \right]$$

Expresión en la que la notación utilizada es la siguiente:

- α_{Total} -Pérdidas totales estimadas para N empalmes expresadas en dB.
- α_{Media} -Atenuación media de cada empalme expresadas en dB.
- σ_e -Desviación típica del empalme.
- N -Número total de empalmes incluyendo los de obligada realización más los estimados en el margen de reparación.

Esta expresión puede utilizarse para la distancia total de tendido, si bien es práctica habitual utilizarla referida a cada una de las secciones de regeneración y al número de empalmes presentes en cada una de ellas.

La atenuación que introducen los empalmes de fusión por sección de regeneración depende obviamente del número de empalmes presentes en la misma.

Los empalmes de fusión concatenan los diferentes tramos del cable de fibra óptica hasta constituir la sección de regeneración o distancia existente en el enlace entre dos repetidores consecutivos.

El número de tramos por sección de regeneración depende a su vez de los condicionantes que determinan la longitud máxima de suministro del cable óptico estipulada por el fabricante.

Longitudes habituales de suministro de los cables ópticos son 2000 ó 4000 metros, aunque en la actualidad algún fabricante suministra hasta 6000 metros.

El número total de tramos presentes por sección de regeneración viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$n = E \left[1 + \left(\frac{\text{Sección de Regeneración}}{\text{Longitud de Suministro}} \right) \right]$$

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

n – Número total de tramos por sección de regeneración.

E – Parte entera de la expresión entre corchetes.

El número total de empalmes que hay que realizar, por sección de regeneración y por fibra óptica, sin tener en cuenta margen de reparación alguno, viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$N = (n + 1)$$

Con el margen de reparación habitualmente utilizado, el número total de empalmes estimados por sección de regeneración se duplica, con lo que el número total de empalmes viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$N = 2 (n + 1)$$

Atenuación Introducida por Conectores Ópticos.

Para enlaces con un pequeño número de conectores ópticos se puede obtener un valor estimativo inicial válido de esta atenuación mediante el producto del número de conectores por el valor de atenuación unitario estimado.

Para su cálculo se toma un valor medio de atenuación por conector óptico de 0.5 dB, muy conservador, si bien se ha de tener en cuenta que al intervenir en cada interconexión dos conectores y un acoplador óptico el valor de atenuación que introduce cada interconexión óptica es de 1 dB.

Para el cálculo de la atenuación estimada que introducen los conectores ópticos, en el caso de enlaces con un gran número de repartidores ópticos intermedios y, por tanto, con un gran número de conectores e interconexiones ópticas, se introduce una nueva variable en el cálculo, que es la desviación típica del valor medio de atenuación por conector.

La desviación típica del valor medio de atenuación por conector se utiliza para el cálculo de un nuevo factor que representa un margen de seguridad estadísticamente

adoptado en cada conexión y que es función del valor de la citada desviación típica y del número de conectores presentes en el tendido.

Este margen, expresado en dB, se suma al valor de atenuación inicialmente obtenido para la determinación del valor estimado de atenuación introducida por los conectores ópticos mediante la siguiente expresión matemática:

$$\alpha_{Total - Conectores} = N_c \left[\alpha_{Media} + 3 \left(\frac{\sigma_c}{\sqrt{N_c}} \right) \right]$$

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

- α_{Total} - Pérdidas totales estimadas para N conectores ópticos expresadas en dB.
- α_{Media} - Atenuación media que introduce cada conector, expresada en dB.
- σ_c - Desviación típica de cada conexión.
- N_c - Número total de conectores ópticos.

Esta expresión puede utilizarse para la distancia total de tendido, si bien es práctica habitual utilizarla referida a cada una de las secciones de regeneración y al número de conectores presentes en cada una de las mismas.

Margen de Reserva de Atenuación

Constituye un margen de seguridad ante posibles fluctuaciones en el balance global de atenuaciones o en el balance global de potencias del enlace.

Su cálculo se realiza inicialmente mediante la estimación de un valor comprendido entre 0.1 y 0.3 dB/km para, seguidamente, obtener su valor mediante el producto del valor estimado por la longitud del cable de fibra que hay que tender.

Un valor de margen de reserva de atenuación global adoptado habitualmente es 3dB, si bien se considera un margen de reserva de atenuación global óptimo el de 6 dB.

Margen de Regeneración

El margen de regeneración de un equipo regenerador de línea es la diferencia acotada, entre los valores máximo y mínimo del margen dinámico del regenerador, expresada en dB.

El margen dinámico del regenerador, viene delimitado por el valor máximo del mismo margen dinámico y por la sensibilidad del regenerador.

Esta característica es la que delimita el ámbito de operatividad del regenerador para una B.E.R prefijada.

La tasa de error de bit se define como el máximo números de bits erróneos admisibles en recepción con respecto al número total de bits presentes en emisión.

Su valor nos da una medida de la calidad del equipo de línea, transmisor más receptor óptico, cuando se procesan señales digitales binarias.

La tasa de bit de error de bit que habitualmente se exige a los sistemas de comunicaciones digitales por fibras ópticas es de un valor de 1×10^{-10} y representa una señal a ruido en el receptor de 22 dB.

Margen de Recepción

El margen de recepción de un receptor o equipo terminal de línea es la diferencia acotada, entre los valores máximo y mínimo del margen dinámico del receptor, expresada en dB.

El margen dinámico del receptor viene delimitado por el valor máximo que presenta el margen dinámico del receptor y por la sensibilidad del receptor.

Esta característica es la que delimita el ámbito de operatividad del receptor para una B.E.R. dada.

Margen de Reserva del Enlace

El margen de reserva del enlace es la diferencia acotada entre el valor de la potencia óptica presente en el lado de recepción y la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación estimado para el enlace, expresada en dB. El valor total de la atenuación planificada para el enlace lo constituye la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación expresados en dB.

En la figura 8.1 que corresponde al protocolo real de medición reflectométrica de un enlace sin secciones de regeneración intermedias, sobre la traza que representa el nivel del coeficiente de retroesparcimiento se han superpuesto los distintos márgenes expuestos.

En el caso de enlaces con unas longitudes de tendido tales que hagan necesaria la inclusión de regeneradores intermedios o enlaces con varias secciones de regeneración, este margen de reserva del enlace es desglosable en dos nuevos márgenes de reserva en función del lado del enlace en el que nos encontremos que son los siguientes:

- Margen de reserva del enlace en lado de transmisión.
- Margen de reserva del enlace en lado de recepción.

Margen de Reserva del Enlace en Lado de Transmisión

El margen de reserva del enlace en lado de transmisión es la diferencia acotada, entre el valor de la potencia óptica presente al final de la primera sección de regeneración y el valor del margen de reserva de atenuación estimado para este primer vano del enlace o primera sección de regeneración del mismo, expresada en dB.

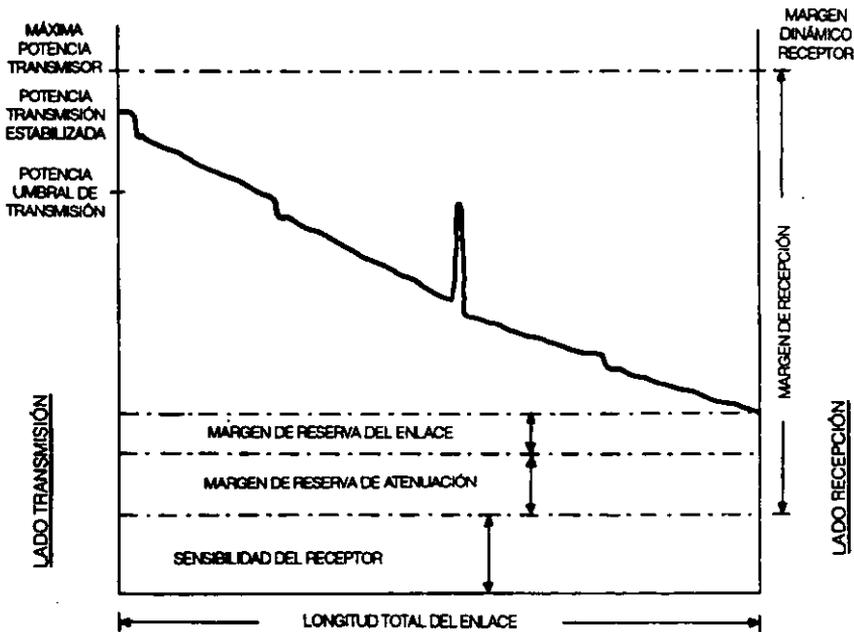


Figura 8.1. Protocolo real de medición reflectométrica de un enlace sin secciones de regeneración intermedias

Margen de Reserva del Enlace en Lado de Recepción

El margen de reserva del enlace en lado de recepción es la diferencia acotada, entre el valor de la potencia óptica presente al final de la última sección de regeneración y la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación estimado para este último vano del enlace o última sección de regeneración del mismo, expresada en dB.

La figura 8.2 corresponde al protocolo real de medición reflectométrica de un enlace con cuatro secciones de regeneración en la que, sobre la traza que representa el nivel de coeficiente de retroesparcimiento, se han superpuesto los distintos márgenes expuestos.

La longitud total del enlace es la suma de la distancia cubierta por el primer vano D1 más las distancias respectivas de las cuatro secciones de regeneración.

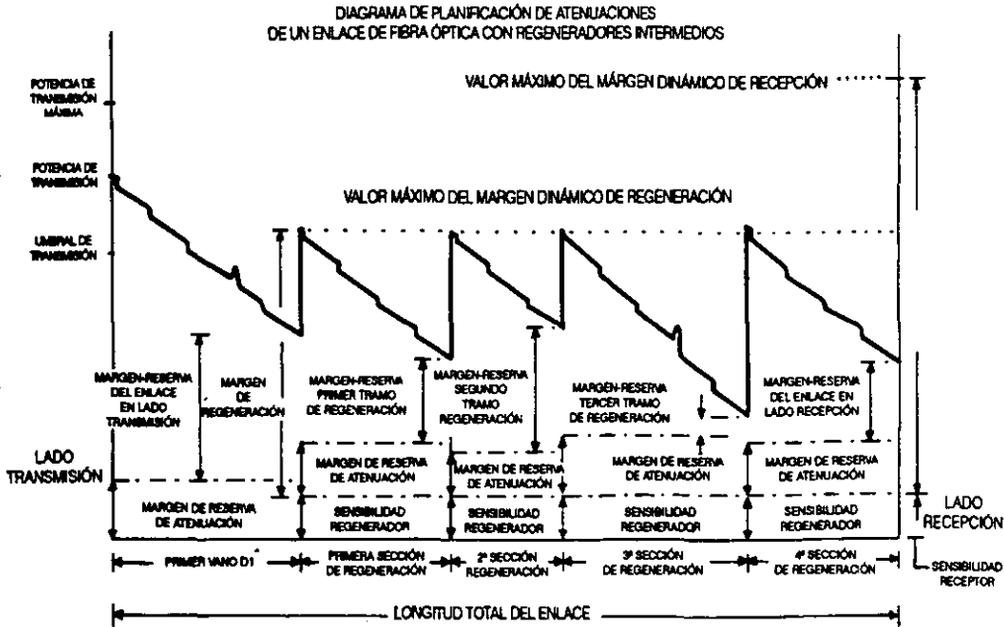


Figura 8.2. Protocolo real de medición reflectométrica de un enlace con cuatro secciones de regeneración

8.3.2 Cálculo del Ancho de Banda del Tendido

Contrariamente a lo que pudiera creerse el ancho de banda del cable de fibra óptica, y, por tanto, del tendido, no permanece constante sino que disminuye en forma proporcional con la longitud de tendido de la fibra óptica.

La disminución en el ancho de banda esta originada por la dispersión intermodal en las fibras ópticas multimodo, y en el caso de las fibras ópticas monomodo por la dispersión intramodal o cromática.

Como consecuencia de la dependencia del ancho de banda de la longitud de tendido los cables de fibra óptica, tanto monomodo como multimodo, están siempre caracterizadas por el producto:

Ancho de banda x longitud, expresado en MHz x km.

Esta dependencia obliga al fabricante del cable óptico a referir el ancho de banda característico de cada cable a una distancia patrón o longitud tipo de 1km.

Como consecuencia, el ancho de banda real del cable óptico para distancias inferiores a 1 km es siempre superior al ancho de banda característico y su valor exacto depende de la serie de factores que a continuación se enumeran:

- Dispersión modal de la fibra óptica multimodo.
- Dispersión cromática de la fibra óptica monomodo.
- Longitud de onda de trabajo del equipo.
- Fuente de luz y anchura espectral de la misma.
- Longitud de la fibra óptica tendida.
- Espectro de emisión de la fuente de luz.
- Acoplamiento entre modos en los empalmes.

El proceso del cálculo del ancho de banda del tendido difiere en función de que el comportamiento de la fibra óptica sea monomodo o multimodo. A continuación se describen ambos procesos de cálculo:

Ancho de Banda con Fibras Ópticas Multimodo

En el caso de los tendidos con fibras ópticas multimodo la determinación exacta del ancho de banda para una longitud específica es de una gran complejidad por los diversos factores que intervienen en su cálculo.

Esta complejidad se evita mediante la utilización de unas gráficas suministradas por los fabricantes de los equipos de línea en las que se determina para cada equipo de línea la

variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido para un tipo de fibra óptica específico.

En la práctica el método más empleado consiste en la utilización de una fórmula exponencial que se caracteriza por realizar una aproximación en base a linealizar las curvas específicas de cada equipo.

Esta fórmula exponencial permite lograr un compromiso óptimo aunando una aproximación razonable al ancho de banda real junto con una notable simplificación en su cálculo.

La expresión matemática de la fórmula exponencial es la siguiente:

$$\left[\frac{1}{B_L} \right] = \frac{1}{B_{f.o.}} \left[\frac{L}{L_0} \right]^\gamma$$

Sin embargo, la expresión la expresión habitualmente utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$B_L = B_{f.o.} L^{-\gamma}$$

La notación utilizada en ambas expresiones es la siguiente:

- $B_{f.o}$ - Ancho de banda característico del cable de fibra óptica utilizado [MHz/km].
- B_L - Nuevo ancho de banda del cable de fibra óptica utilizado, pero caracterizado para la nueva longitud L (siempre mayor de 1 km).
- L - Nueva longitud de tendido del cable.
- γ - Exponente longitudinal: se trata de un factor que es variable en función de la longitud pero que se encuentra comprendido entre 0.7 y 0.9. Su valor habitual de estimación es de 0.75.
- L_0 - Longitud característica de un 1 km, a la cual esta definido el ancho de banda característico del cable óptico: $B_{f.o.}$

La figura 8.3. representa las variaciones del ancho de banda en función de la longitud del tendido para un diodo láser trabajando en una longitud de onda de 850 nm conectando a dos fibras ópticas con anchos de banda característicos de 500 MHz x km y 1000 MHz x km.

La traza No. 1 representa la variación real del ancho de banda en función de la longitud de tendido de cable óptico que se produce al interconexionar un diodo láser, trabajando en una longitud de onda de 850 nm, a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 500 x km.

La traza No. 2 representa la variación real del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconexionar un diodo láser, trabajando en una longitud de onda de 850 nm, a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 1000 MHz x km.

La traza No. 3 representa la limitación máxima en el ancho de banda originada por la dispersión intermodal de la fibra óptica trabajando en una longitud de onda de 850 nm.

La traza No. 4 representa la limitación máxima en el ancho de banda originada por la dispersión intermodal de la fibra óptica trabajando en una longitud de onda de 1300 nm.

La traza No. 5 representa la aproximación a la traza No. 1 mediante la utilización de la fórmula exponencial en la que se ha tomado un valor del exponente longitudinal de 0.8.

Representa, por tanto, una aproximación de la variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconexionar el citado diodo láser a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 500 MHz x km.

La traza No. 6 representa la aproximación a la traza No. 2 mediante la utilización de la fórmula exponencial en la que se ha tomado un valor del exponente longitudinal de 0.8.

Representa, por tanto, una aproximación de la variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconectar nuevamente el citado diodo láser a una fibra óptica con un ancho de banda característico de $1000 \text{ MHz} \times \text{km}$.

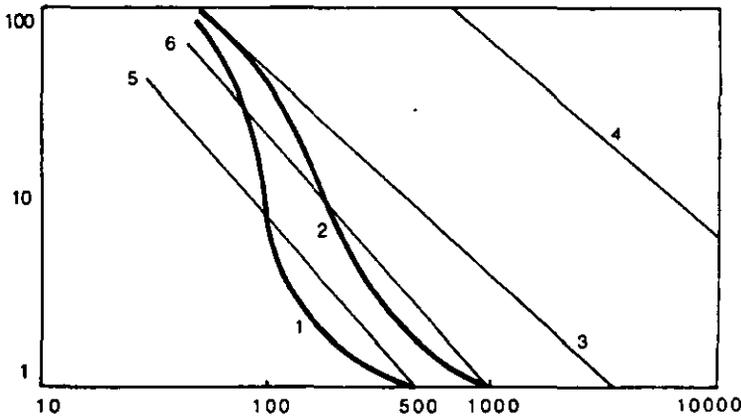


Figura 8.3. Variaciones del ancho de banda en función de la longitud del tendido

El eje de abscisas representa en escala logarítmica el ancho de banda expresado en $\text{MHz} \times \text{km}$ mientras que el eje de ordenadas representa la longitud del tendido del cable óptico expresado en km .

El paso siguiente consiste en hacer la conversión del ancho de banda óptico, característico del cable obtenido anteriormente, a unidades eléctricas o ancho de banda eléctrico homogeneizando de esta forma los valores de anchos de banda de transmisor y receptor mediante la siguiente relación matemática:

$$B_{\text{Eléctrico}} = B_{\text{óptico}} \sqrt{2}$$

El valor de ancho de banda que así se obtiene representa la limitación en el ancho de banda que nos introduce el tendido de fibra óptica expresado en unidades eléctricas.

Ancho de Banda con Fibras Ópticas Monomodo

El ancho de banda en el caso de los tendidos de fibra óptica monomodo está determinado por el fenómeno físico de la dispersión cromática.

La dispersión cromática provoca un retardo del haz lumínico, retardo que es directamente proporcional a la longitud de la fibra óptica tendida y que influye de forma proporcional en la disminución del ancho de banda total del tendido.

La expresión matemática que nos permite el cálculo del retardo producido en la propagación del pulso lumínico es la siguiente:

$$\Delta T = \sigma_{\text{cromática}} \Delta\lambda L$$

- ΔT - Retardo de propagación del pulso lumínico, expresado en ps.
- $\sigma_{\text{cromática}}$ - Dispersión cromática de la fibra óptica utilizada, expresada en ps/nm x km.
- L - Longitud del tendido del cable de fibra óptica.
- $\Delta\lambda$ - Anchura espectral de la fuente de luz utilizada, expresada en nm.

La expresión matemática que nos relaciona el ancho de banda total del tendido con el retardo producido en la propagación del pulso lumínico, supuesto un espectro de emisión gaussiano de la fuente de luz, es la siguiente:

$$B_t = \frac{0.441}{\Delta T}$$

Expresión en que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- B_t - Ancho de banda total del tendido de fibra óptica, caracterizado para la longitud total del mismo L , expresado en MHz x km.
- ΔT - Retardo de propagación del impulso lumínico, expresado en ps.

8.3.3 Ley de Concatenación del Ancho de Banda

El fenómeno de la concatenación del ancho de banda se produce únicamente cuando se interconexionan o concatenan diversos tramos de fibras ópticas multimodo con anchos de banda unitarios distintos.

Siempre se verifica que el ancho de banda resultante del tramo total es menor que el menor de los anchos de banda unitarios de los tramos interconexionados.

El nuevo ancho de banda, de la trama total, se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$B_T = \left[\sum_{i=1}^n B_i^{\frac{-1}{\tau}} \right]^{-\tau}$$

- B_T - Ancho de banda total, expresado en MHz x km.
- B_i - Ancho de banda unitario de cada tramo en MHz x km.
- n - Numero de tramos.
- τ - Factor de concatenación. (Adimensional).

El valor del factor de concatenación se obtiene empíricamente y es un dato que suministra habitualmente el fabricante de la fibra óptica.

En caso de desconocimiento del valor exacto del factor de concatenación para las fibras ópticas multimodo con perfil gradual del índice de refracción y con dimensiones geométricas de 50/125 micras, su valor fluctúa entre los márgenes comprendidos entre 0.5 y 0.7.

8.4 CÁLCULO DEL ANCHO DE BANDA REQUERIDO POR EL ENLACE

El cálculo del ancho de banda que requiere el enlace se realiza en base al tipo de señal que se prevé utilizar en el mismo.

En función del tipo de señal, los datos necesarios para el cálculo del ancho de banda del enlace son:

- Señal analógica. Será necesario conocer el ancho de banda de transmisión expresado en MHz y la relación señal/ruido.
- Señal digital. Será necesario conocer la velocidad de transmisión expresada en Mbits/s y el tipo de codificación usada en la misma.

8.4.1 Cálculo del Ancho de Banda Requerido por los Sistemas Digitales.

El cálculo del ancho de banda que requiere un sistema digital, expresado en MHz, se obtiene del cociente entre la velocidad de transmisión y un parámetro característico del tipo de codificación usada.

En el caso del código R.Z el parámetro característico del tipo de codificación utilizada (f.codificación) toma el valor de la unidad, mientras que para el caso de del código N.R.Z adopta el valor de 1.4.

El ancho de banda que requiere un sistema digital se obtiene conforme la siguiente expresión matemática:

$$\text{Ancho de banda (MHz s)} = \frac{\text{V transmisión (Mbits/s)}}{\text{f.codificación.}}$$

8.5 CARACTERIZACIÓN DEL TRANSMISOR

La caracterización del transmisor se realiza en base a las características que suministra el fabricante del mismo.

Los datos necesarios para la caracterización del transmisor son los siguientes:

- *Potencia de emisión en dBm.*

La potencia de emisión de los equipos se expresa en microwatios, que se habrán de convertir en dBm mediante la siguiente expresión matemática:

$$P(\text{dBm}) = \left[\frac{10 \log P(\mu\text{W})}{1000 \mu\text{W}} \right]$$

El valor que se obtiene de la potencia de emisión, expresado en dBm, se utilizará en el punto final para realizar el balance global de potencias.

- *Ancho de banda del transmisor.*

Este dato lo suministra directamente el fabricante del equipo, siempre se facilita en unidades eléctricas y tan sólo habrá que cerciorarse de que las unidades del ancho de banda se expresen en MHz.

8.6 CARACTERIZACIÓN DEL RECEPTOR

La caracterización del receptor se realiza en base a las características que suministra el fabricante mismo.

Los datos necesarios para la caracterización del receptor son los siguientes:

- ***Cálculo del margen dinámico***

El margen de recepción de los equipos que nos garantizan unos valores de la tasa de error de Bit B.E.R está prefijado por el fabricante del equipo.

Las dos cotas que determinan el margen de recepción son, respectivamente, el valor de sensibilidad mínima del receptor y el valor de sensibilidad máxima del mismo.

Ambos valores se expresan en μW y su conversión a dBm se realiza de forma análoga a como se realizó la conversión de la potencia de emisión del transistor.

La diferencia entre ambas cotas expresada en dBm, representan el margen dinámico que se utilizará en el punto final para comprobar si el balance global de potencias cuadra con respecto al margen dinámico.

- ***Ancho de banda del receptor***

Este dato lo suministra directamente el fabricante del equipo siempre se facilita en unidades eléctricas y tan solo habrá que cerciorarse de que las unidades del ancho de banda se expresen en MHz.

8.7 ANALISIS GLOBAL DE LA VIABILIDAD DEL ENLACE.

8.7.1 Balance Global de Potencias

El balance global de potencias consiste en realizar la suma en dBm, del plan de atenuaciones del tendido más la potencia de emisión del enlace.

Seguidamente, se comprueba que el valor de la suma en dBm, se encuentran dentro del margen dinámico del receptor y por lo tanto el sistema es viable desde el punto de vista del balance de potencias.

Un dato adicional importante es el conocimiento del margen de reserva del enlace por ser un nuevo margen que es necesario prever y que aumentará el valor que ya teníamos estimado con anterioridad para el margen de reserva de atenuación.

8.7.2 Ancho de Banda Global del Enlace.

El ancho de banda global del enlace se calcula mediante el uso de una expresión matemática, siendo los datos necesarios para su cálculo los siguientes:

- Ancho de banda del tendido
- Ancho de banda del transmisor
- Ancho de banda del receptor

$$B_{Enlace} = \left[\frac{I}{\left[\frac{I}{B_{Tendido}^2} \right] \left[\frac{I}{B_{Transmisor}^2} \right] \left[\frac{I}{B_{Receptor}^2} \right]} \right]$$

El resultado que se obtiene es el ancho de banda global del enlace y se habrá de cumplir para que el enlace sea viable que su valor sea superior al valor del ancho de banda requerido por el sistema.

CONCLUSIONES

Al término de este trabajo se logró el objetivo perseguido, el cual fue dar una visión amplia de las partes que conforman un enlace por fibra óptica, para de esta forma establecer los parámetros y consideraciones que se deben tener bien definidos al momento de planificar un enlace de este tipo.

Al momento de tener todas las características (longitudes, frecuencias requeridas, tipo de terreno, etc.) de las partes a enlazar se procede a someter todos estos aspectos a los lineamientos que se mencionaron en capítulo ocho y a lo largo de este trabajo. Es de esta manera como se comienzan a realizar los cálculos necesarios que requiere el enlace y en general se verifica la viabilidad del mismo, de ahí la importancia de lo analizado en el presente trabajo.

Cabe destacar que al término de este trabajo el lector puede darse cuenta del riesgo que se corre al no seguir los lineamientos de planificación de un tendido de fibra óptica, ya que el éxito de un proyecto de este tipo, así como de muchos otros, dependerá de la buena o mala planeación que se haya realizado.

Por otra parte se observaron y expusieron aspectos de los sistemas de comunicación por fibra óptica que a simple vista parecen carecer de importancia pero que pueden llegar a ser factores determinantes en la vida del tendido de fibra óptica (tensiones, aspectos ambientales, factores que afectan el tiempo de vida, etc).

También a lo largo de este trabajo se pudo apreciar la gran variedad que existe para cada uno de los elementos que integran un enlace por fibra óptica, ya sean cables, fuentes o detectores ópticos, pudimos constatar la amplia diversidad que estos elementos presentan, y de esta forma al momento de elegir alguno de ellos se sepa de antemano la existencia y

características de cada uno de ellos y escoger así los elementos que mejor se adecuen a las necesidades del tendido de fibra óptica o proyecto en cuestión.

Por último se puede concluir que entre más consideraciones y cuidados se tengan al momento de planear un enlace por fibra óptica, mejores resultados se obtendrán y menos percances se presentarán en la instalación y funcionamiento del enlace.

GLOSARIO

Apertura numérica: Es el valor numérico del seno del ángulo máximo de aceptación del haz lumínico en la fibra. Depende únicamente del valor de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. Es adimensional.

Cable bifibra: Este tipo de cables consta de dos fibras ópticas y por lo general están confeccionados en estructura ajustada.

Cable monofibra: Cable que consiste de una sola fibra óptica y que por lo general están confeccionados en estructura ajustada.

Cable multifibra: Cable que consta de un número variable de fibras ópticas y que están confeccionados en estructura ajustada.

Cable óptico: Elemento que agrupa a una o varias fibras ópticas. Tiene la función de guiar en su interior a las fibras ópticas y protegerlas de todos los agentes que pudieran atacarlas.

Conector: Los conectores son uniones removibles empleados para conectar la fibra óptica tanto al transmisor como al receptor.

Diodo Emisor de Luz (LED): Los diodos emisores de luz son fuentes de luz con emisión espontánea (no coherente), son diodos semiconductores $p-n$ que para emitir luz se polarizan directamente.

Diodo Láser (LD): Los diodos láser son fuentes de emisión estimulada y contienen dos espejos semirreflejantes para formar una cavidad resonante y así realizar retroalimentación óptica. Son emisores de radiación coherente, es decir, monocromática, de longitud espectral muy pequeña y directiva.

Emisor óptico: Elemento que tiene por función transformar la información en forma de señal eléctrica a información en forma de luz. También se le conoce como módulo de emisión.

Empalme: Unión permanente entre dos secciones de fibras ópticas.

Fibra de índice escalonado: Fibra óptica con un cambio súbito del índice de refracción absoluto en la unión del núcleo y el recubrimiento.

Fibra de índice graduado: Fibra óptica en la cual el núcleo está fabricado con un material que tiene un índice de refracción absoluta graduado, el cual es mayor en el centro del núcleo y disminuye gradualmente hacia la orilla exterior en la que toca el recubrimiento.

Fotodetector de avalancha: Fotodetector que emplea el fenómeno de avalancha de manera controlada (limitando la corriente) para aumentar notablemente la sensibilidad del fotodetector.

Fotodetector PIN: Los fotodetectores PIN son dispositivos que se forman con una capa de material semiconductor ligeramente contaminado, que se le llama región intrínseca (*i*), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, una tipo *n* y una tipo *p*.

Índice de refracción: Es una constante para dos materiales cuales quiera que están en contacto entre sí. El índice de refracción está dado por la relación $\sin \phi_i / \sin \phi_r$.

Medio de transmisión: Elemento físico por el cual se transmite (viaja) la información; independientemente del sistema de comunicación empleado.

Núcleo: Es la zona interior de la fibra óptica y por la que se propaga el haz lumínico.

Receptor óptico: Elemento que tiene por función transformar la información óptica recibida en información con la forma de señal eléctrica. También se le conoce como módulo de recepción.

Recubrimiento primario: Sustancia dieléctrica que recubre al revestimiento de la fibra óptica y es concéntrico con el mismo.

Refracción: Fenómeno que se presenta cuando una onda de luz pasa de un material a otro, provocando el cambio de dirección del viaje de la misma.

Ruido cuántico: Son fluctuaciones de origen cuántico. La manifestación de este ruido se da en la estadística de la fotodetección, es decir, por la aleatoriedad de la generación de portadores.

Sistema de comunicación por cable metálico: Sistema de comunicación que necesita de un medio físico como un canal de transmisión para transmitir la información y que además éste debe ser conductor de electricidad (par de alambres, cable coaxial, guía de onda). En este tipo de sistemas la información viaja en forma de ondas o impulsos eléctricos.

Sistema de comunicación por fibra óptica: Sistema de comunicación que emplea un medio físico dieléctrico como canal de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de rayos de luz que son ondas electromagnéticas.

Sistema de radiocomunicación: Sistema de comunicación que emplea el espacio como medio de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de ondas electromagnéticas.

Transductor: Dispositivo que transforma la manifestación de un fenómeno físico en oscilaciones de voltaje y corriente.

BIBLIOGRAFÍA

SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS ÓPTICAS

HILDEBERTO JARDÓN AGUILAR

ROBERTO LINARES

MÉXICO: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, 1995

COMUNICACIONES ÓPTICAS

JOSÉ MARTÍN SANZ

ESPAÑA: PARANINFO, 1996

INTRODUCCIÓN A LAS TELECOMUNICACIONES POR FIBRAS ÓPTICAS

JEAN PIERRE NÉROU

MÉXICO: TRILLAS, 1991

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

P.H.SMALE

MÉXICO: TRILLAS, 1993

OPTOELECTRÓNICA

J. WATSON

MÉXICO: LIMUSA, GRUPO NORIEGA, 1993