

300617

18
2e)



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

"TRANSMISION DE DATOS:
DISEÑO DE ENLACES TELEFONICOS DE
LARGA DISTANCIA POR MEDIO DE FIBRA OPTICA"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA EN ELECTRONICA
P R E S E N T A N :
ADRIANA GARCIA EVANGELISTA
JUAN JOSE GUZMAN MORALES
FERNANDO A. MEZA VELASCO
ARMANDO ROMERO URIEGA
GABRIELA VAZQUEZ LARENAS

ASESOR DE TESIS: ING. CARLOS HERNANDEZ PEREZ

MEXICO, D. F.

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.



LA SALLE

A los Pasantes Señores:

Adriana García Evangelista
Juan José Guzmán Morales
Fernando Adalberto Meza Velasco
Armando Romero Uriega
Gabriela Vazquez Larenas

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Ud. a continuación, el tema que aprobado por esta Dirección, propuso como Asesor de Tesis el Ing. Carlos Hernández Pérez, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista con área principal en Ingeniería Electrónica.

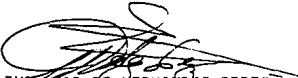
**"TRANSMISION DE DATOS:
DISEÑO DE ENLACES TELEFONICOS DE LARGA DISTANCIA
POR MEDIO DE FIBRA OPTICA"**


con el siguiente índice:

	INTRODUCCION
CAPITULO I	COMUNICACIONES DIGITALES
CAPITULO II	MODULACION Y CODIFICACION PCM
CAPITULO III	MULTIPLEXAJE DIGITAL
CAPITULO IV	FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES
CAPITULO V	TRANSMISORES Y DETECTORES
CAPITULO VI	DISEÑO DEL ENLACE
CAPITULO VII	INSTALACION Y PRUEBAS
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFIA

Ruego a Ud., tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

A T E N T A M E N T E
"INDIVISA MANENT"
ESCUELA DE INGENIERIA
México, D.F., a 23 de Marzo de 1994


ING. CARLOS HERNANDEZ PEREZ
ASESOR DE TESIS


ING. EDMUNDO BARRERA MONSIVAIS
D I R E C T O R

UNIVERSIDAD LA SALLE

BENJAMIN FRANKLIN 47, TEL. 516-89-80 MEXICO 06140, D.F.

A nuestro profesor, asesor y amigo Carlos Hernández por habernos guiado con verdadera vocación de maestro.

Gracias por tu paciencia, empeño y exigencias, ya que así veremos concluida una meta más a nuestras vidas, y sobre todo, por haber depositado tu confianza en nosotros para la elaboración de esta tesis, un proyecto en común.

*Gabriela, Adriana,
Juan José, Fernando,
Armando.*

*A Dios, por ser la fuerza y guía de mi vida,
que con su palabra y amor me han hecho
más que vencedora.*

*A mis padres, Isauro y María Luisa, quienes con su
amor, apoyo, confianza, sabiduría y enseñanzas, han
sido los mejores guías de mi vida. Por ser el mejor
ejemplo que tengo de vida y amor. Gracias*

*A mis hermanos, Claudia y Rafael, quienes
son los mejores regalos que Dios me ha dado,
por su amor y confianza. Gracias*

*A César, que con su amor, apoyo y confianza me
impulso a lograr esta meta. Por que eres la mejor
bendición que Dios me ha dado. Gracias Gordito*

*A mis amigas, Rocío, Mónica y Martha, con
quienes he compartido los mejores momentos
de mi infancia y juventud, a quienes quiero
mucho.*

*A mis amigos; Ludovico, Mauricio y Eduardo,
que representan el mejor ejemplo de una verdadera
amistad.*

*A mis compañeros de tesis: Gaby, Fernando
Juan José y Armando, por compartir conmigo
una de mis principales metas en la vida.
Gracias por todo*

Adriana

*A Dios; por darme salud, fuerza y
oportunidades para continuar avanzando.*

*A mi padre, el Ing. Rafael Guzmán Blanquel; que
me dejó como herencia el haberme educado en
el mundo de los principios y valores.*

*A mi madre, Leonor; por estimularme con
su empuje y optimismo en todo lo que hace,
demostrando su amor a la vida.*

*A mi esposa, Marú; deseando que siempre
encontremos juntos la luz en nuestros caminos.*

*A mi hijo, Rafael; por ser el principal
motivador en mi vida.*

Juan José

A MIS PAPAS: *Gracias por su apoyo y enseñanzas a lo largo de toda mi vida y por el deseo de que tengamos siempre lo mejor.*

A MI TIA: *Gracias Tia Semiramis por darme tu cariño, tu respeto y amistad desde que tengo memoria.*

A MI HERMANO: *Gracias por compartir conmigo tus alegrías, tus éxitos y hacerme participe de ellos*

A MI NOVIA: *Gracias Regina por tener tu apoyo en todos mis proyectos y darme siempre una sonrisa.*

A MIS MAESTROS: *Gracias por su entusiasmo y por creer en mí.*

Fernando

A Dios: por la dicha de la vida misma

*A mis padres; Perfecto y Georgina a quienes
admiro profundamente por su entrega y
dedicación a esa noble tarea de ser padres
y a quienes debo mi gratitud y todo mi amor
por motivar mi desarrollo personal y profesional*

*A mi esposa; Arianna Lucía, quien ha sido la
fuente de inspiración en mis logros y objetivos y
quien con amor y ternura me ha alentado en el
desarrollo y culminación de esta meta*

*A mis hijos; Arianna Lucía y Jorge Armando
quienes son mi orgullo y la razón más fuerte
de mi existencia.*

*A mis hermanas; Rosa María, Ana Laura,
Georgina y Susana Luz: quienes con su paciencia,
carinho y comprensión han contribuido a la formación
de mi vida integral y con quienes siempre he tenido la
dicha de compartir los mejores momentos de mi vida.*

*A Empresa Tecnológica Ericsson
que me proporcionó el apoyo
necesario para el desarrollo
de esta meta.*

Armando

A Dios por el don maravilloso de mi vida

A mi madre: Pilar y a la memoria de mi padre: Dr. Rodolfo Vázquez, por sus tantas horas de dedicación y desvelo, por su total entrega, por su amorosa guía y por los valores que llevo en mí. Gracias

A mis hermanas Laura, Claudia y a la memoria de mi hermano Ulises, por todo lo que los admiro y quiero.

A mi hermana Adriana y a Jorge, a mis sobrinos Alonso, Gerardo y Andrea por todo su apoyo, ayuda y comprensión, en todos los momentos difíciles y sobre todo en los felices de mi vida.

A mis amigas de toda la vida: Tere, Laura, Lulu, Gaby y Claudia que una vez más están compartiendo los mejores momentos de mi vida.

A mi querido amigo el Ing. Carlos Enrique quien a lo largo de toda la carrera me ha ayudado tanto y de quien solo he recibido muestras de afecto y amistad.

A Gustavo por su gran apoyo, compañía y cariño con el que cuento y por todo el amor que representa para mí.

A mis compañeros de tesis: Adriana, Fernando, Juan José y Armando por su entusiasmo y cooperación

Gabriela.

INDICE

I. Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Descripción de enlaces de larga distancia telefónica	6
1.3 Tendencias y aplicaciones futuras	11
1.4 Requerimientos actuales	17
2. Comunicaciones Digitales	19
2.1 Conceptos básicos de comunicaciones digitales	19
2.1.1 Sistemas de comunicación	20
2.1.2 Señales de comunicación	21
2.1.3 Tipos de señales	21
2.1.4 Espectro electromagnético	23
2.2 Conceptos de telecomunicaciones	25
2.2.1 Transmisión de datos	25
2.2.2 Modos de transmisión	25
2.2.3 Sistemas de transmisión de datos	26
2.2.4 Problemas para la transmisión	27
2.3 Códigos de comunicación	30
2.4 Transmisión de información digital	32
2.5 Sincronización	34
2.5.1 Códigos de línea	35
2.6 Tipos de modulación digital	39
2.6.1 Transmisión de señales	39

2.6.2 Transmisión por medio de señales discretas.....	40
2.6.3 Muestreo	40
2.6.4 Transmisión por pulsos	41
2.7 Detección y corrección de errores.....	44
2.7.1 Detección de error.....	44
2.7.2 Corrección de error.....	46
2.8 Probabilidad de error y tasa de error en bits	47
2.9 Protocolos	49
3. Modulación y Codificación PCM.....	51
3.1 Filtros.....	52
3.2 Modulación por Pulsos Codificados (PCM)	58
3.3 Códigos Utilizados en PCM.....	67
3.4 Modulación Delta PCM y Delta Adaptiva PCM.....	74
3.4.1 Modulación Delta PCM	75
4. Multiplexaje Digital.....	79
4.1 Multiplexaje por División de Tiempo (TDM)	80
4.2 Sistema de Portadora TDM	85
4.3 Jerarquías Digitales.....	88
4.4 Codificadores y Decodificadores (CODECS).....	90
5. Fibra óptica en comunicaciones.....	91
5.1 Evolución de las fibras ópticas	91
5.1.1 El mercado de fibra.....	94
5.2 Ventajas y desventajas	96

5.2.1 Ventajas.....	96
5.2.2 Desventajas.....	99
5.3 Principios de operación y parámetros característicos.....	100
5.3.1 Longitud de Onda.....	101
5.3.2 Leyes de reflexión y refracción.....	101
5.3.3 Apertura Numérica.....	105
5.3.4 Longitud de Onda de Corte.....	109
5.3.5 Frecuencia Normalizada.....	109
5.3.6 Pérdida de Fresnel.....	110
5.3.7 Atenuación.....	110
5.3.8 Dispersión.....	112
5.3.9 Dispersión cromática.....	113
5.3.10 Tipos de fibras ópticas.....	113
5.4 Conectores y empalmes.....	122
5.4.1 Atenuación en los conectores.....	123
5.4.2 Tipos de conectores.....	128
5.4.3 Empalmes.....	133
5.4.4 Técnicas de empalme.....	136
5.5 Tipos de cables ópticos.....	145
5.5.1 Parámetros característicos en un cable óptico.....	145
5.5.2 Estructuras de cable.....	148
6. Transmisores y Detectores.....	151
6.1 Diodo emisor de luz (LED).....	153
6.1.1 Emisión Espontánea.....	154
6.1.2 Características de los LED.....	160
6.1.3 Tipos de LEDs.....	163

6.2 Diodo láser de inyección (ILD)	167
6.2.1 Emisión Estimulada	167
6.2.3 Diodo Láser de Homounión	171
6.2.4 Láser de heterounión	172
6.2.5 Materiales semiconductores	173
6.2.6 Modos láser	174
6.2.7 Principales características de un láser de inyección	176
6.3 Detectores ópticos	181
6.3.2 Tipos de dispositivos	183
6.3.3 Principios de la detección óptica	184
6.3.4 Absorción	185
6.3.5 Absorción directa e indirecta: silicio y germanio	187
6.3.6 Fotodiodos p-i-n	188
6.3.7 Fotodiodos Avalancha (APD)	191
6.3.8 Consideraciones para el uso del detector de detección directa	194
6.4 Sistemas de transmisión y recepción	196
6.4.1 Circuito manejador del LED	197
6.5 Transmisión Digital	197
6.6 Circuito Manejador del Láser	200
6.7 El circuito detector óptico	202
7. Diseño del Enlace	205
7.1 Equipos característicos	205
7.1.1 Nociones básicas	205
7.1.2 Equipos de Línea	206
7.1.3 Alojamiento de los equipos de transmisión	207

7.1.4 Alimentación de energía.....	207
7.1.5 Supervisión y localización de fallas.....	207
7.2 Elementos que intervienen en el enlace.....	210
7.2.1 Cajas de empalme.....	210
7.2.2 Caja de empalme cilíndrica.....	210
7.2.3 Caja de empalme rectangular.....	211
7.2.4 Cajas para regeneradores.....	212
7.2.5 Empalmes y conectores.....	212
7.2.6 Procedimiento para la instalación de cajas de empalme.....	212
7.3 Datos y especificaciones para el enlace.....	215
7.3.1 Datos fundamentales.....	215
7.3.2 Asumción de la transmisión.....	215
7.3.3 Margen del sistema.....	216
7.3.4 Método para el cálculo de la atenuación del sistema.....	216
7.3.5 Método para el cálculo del ancho de banda del sistema.....	217
7.4 Cálculo del enlace.....	218
7.4.1 Umbral de detección.....	218
7.4.2 Flujo energético emitido por la fuente.....	219
7.4.3 Pérdidas por acoplamiento y conexiones.....	220
7.4.4 Representación gráfica del cálculo energético.....	220
7.4.5 Cálculo numérico del enlace.....	223
8. Instalación y Pruebas.....	229
8.1 Tipos de instalaciones de fibras ópticas.....	229
8.1.1 Instalación en ductos subterráneos.....	229
8.1.2 Instalación directamente enterrado.....	230
8.1.3 Instalación aérea.....	231

8.1.4 Instalación submarina.....	231
8.1.5 Instalación en interiores.....	232
8.2 Consideraciones y cuidados para una instalación.....	235
Pruebas para garantizar un enlace.....	235
8.2.1 Generalidades.....	235
8.2.2 Protocolo de Instalaciones.....	238
8.3 Equipos de medición.....	248
8.3.1 Introducción.....	248
8.3.2 Medidas de retrodispersión.....	248
8.3.3 Mediciones en cable de fibra óptica.....	249
8.3.4 Medición de atenuación de empalmes.....	251
8.3.5 Mediciones en Pig-Tails y Jumpers.....	252
Conclusiones y Recomendaciones.....	257
Glosario.....	258
Bibliografía.....	265

1. INTRODUCCION

Hoy en día los sistemas de comunicaciones representan uno de los medios y la base de cualquier economía capaz de mantener actualizado e informado en forma rápida y oportuna a otros países de todo el mundo.

Actualmente, las fibras ópticas desempeñan un papel relevante en las telecomunicaciones, en virtud del acelerado desarrollo que han tenido los medios de comunicación en la mayoría de los países del mundo, y es probable que su uso sea indispensable en el futuro.

No es exagerado decir que los sistemas de comunicación actuales no solo son necesarios para los negocios, la industria, la banca y la divulgación de la información al público sino también esenciales para el bienestar y la defensa de las naciones.

El propósito de este trabajo es describir los procedimientos que se efectúan hoy en día para la realización de los enlaces de larga distancia por medio de fibras ópticas. Su principal importancia radica en que, a nivel mundial, la comunicación por fibras ópticas ha tenido grandes avances en los últimos diez años dando esto como resultado un crecimiento inesperado en la infraestructura de las comunicaciones.

En nuestro país actualmente se requiere de ingenieros calificados en el área de las comunicaciones para cubrir con las demandas crecientes en esta área.

Asimismo este trabajo pretende dar los elementos necesarios para guiar a la población ingenieril dedicada a las comunicaciones por fibra óptica en el desarrollo de sus actividades profesionales.

También se reconoce del esfuerzo de las diferentes compañías en todo el mundo para hacer que los "Enlaces de Comunicación de Larga Distancia" sean una realidad con servicios eficientes, flexibles e integrados.

Con base a los objetivos indicados, esta tesis se desarrolló cubriendo los siguientes capítulos:

INTRODUCCION

El capítulo uno describe los antecedentes en la telefonía que llevaron al desarrollo de sistemas de comunicación por fibra óptica, así como las tendencias y aplicaciones futuras.

El capítulo dos presenta una descripción general de los sistemas de comunicación. Debido a que la información que se maneja es de carácter digital, se enfocará el capítulo a los sistemas de comunicación digital.

El capítulo tres analiza la modulación por pulsos codificados (PCM) con el fin de entender las ventajas que presenta esta forma de transmisión de voz y datos.

El capítulo cuatro describe el multiplexaje digital y su utilización en las transmisiones digitales.

El capítulo cinco explica los principales parámetros que intervienen en el análisis de la fibra óptica, las ventajas y desventajas; así como también las formas de conexión de las fibras y los tipos que existen.

El capítulo seis estudia los diferentes sistemas de transmisión y recepción tales como los diodos láser, diodos LED, fotodiodos APD y diodos PIN respectivamente, como medio de transmisión y recepción del haz de luz.

El capítulo siete da un enfoque de diseño del enlace, los equipos característicos y los elementos que intervienen en éste. Se analizan los datos y especificaciones que se requieren para que sea posible.

El capítulo ocho describe los distintos tipos de instalaciones de fibra óptica además, se dan las consideraciones y cuidados para éstas. Por último se describen las pruebas que garantizan el enlace con el uso de equipos de medición.

1.1 ANTECEDENTES

Una de las principales necesidades del ser humano es entablar una comunicación con sus semejantes. En una primera instancia, el hombre satisface esta necesidad por medio del habla, de la voz articulada, que le permite establecer un contacto con los demás hombres. Sin embargo, es importante señalar que la voz humana soluciona el problema de comunicación únicamente en distancias cortas.

Ahora bien, para comunicarse a grandes distancias, los hombres han ideado, a través del tiempo, diversos medios, desde los más elementales como la percusión, las señales de humo, los reflejos solares, etc., hasta los más avanzados como la comunicación vía satélite o por fibra óptica.

En primera instancia el hombre soluciona su primera necesidad de comunicarse, por medio del teléfono, el cual es un conjunto de aparatos e hilos conductores, mediante los cuales se transmite a distancia la palabra y toda clase de sonidos utilizándose corrientes eléctricas. Su funcionamiento se funda en las corrientes inducidas que producen las variaciones periódicas de un campo magnético.

Una lámina vibrante produce cambios periódicos en un cuerpo magnético los que tienen las mismas frecuencias o intensidades relativas que las voces o sonidos; estos cambios producen corrientes inducidas cuyas intensidades obedecen a las mismas variaciones y esta corriente determina otro campo magnético variable en igual forma que el primero, y hace vibrar otra lámina, que reproduce vibraciones y, por tanto, los mismos sonidos que la primera. Así pues, en el teléfono hay que considerar un receptor del sonido en el que generalmente hay un micrófono, la línea de conducción y un reproductor del sonido denominado auricular.

* Durante los primeros años de la telefonía, la red se construía según el principio de que cada abonado debía de tener una línea a todos los demás abonados de la red.

En el servicio de teléfonos existe una central que establece la comunicación de un abonado con otro, enlazando la línea de una estación telefónica, la de llamada, con otra, a la del receptor. Esta forma de red se emplea todavía en algunos casos para sistemas de telecomunicaciones muy pequeños.

INTRODUCCION

En principio la central telefónica trabaja según un programa incorporado, con ayuda de la información de destino que se obtiene del abonado *A* en cada enlace de habla.

Cuando el abonado *A* llama a la central telefónica, ésta tiene que conectar un receptor para poder recibir la información de destino. Una vez elaborada esta información, se conectará el enlace en la dirección, bien hacia un abonado *B* conectado en la propia central o hacia otra central para seguir la conexión del enlace.

Lo primero que el abonado *A* hace es llamar a la central telefónica para obtener sus servicios. Puesto que la cantidad de abonados es grande, el equipo destinado a la función de llamada, por razones de tipo económico, debe ser lo más sencillo posible. El abonado *A* descuelga su auricular, entonces el muelle de la horquilla o de los botones de horquilla suelta y se cierra un contacto como se muestra en la figura 1.1. A este contacto están conectados los dos hilos de la línea de abonado (los hilos *a* y *b*).

Cuando el contacto cierra se forma un circuito de corriente continua desde la central, por los hilos de la línea de abonado al aparato telefónico, en la central un órgano de llamada (un relé) registra la llamada.

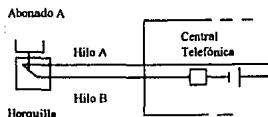


Figura 1.1 Línea de abonado

La central conecta un receptor de señal adecuada a la línea de abonado, con el fin de poder recibir la información de destino, esto es el número del abonado *B*. El abonado *A* recibe el aviso de que la central está preparada mediante un tono de marcar y después, marcando las cifras en el disco dactilar, el abonado *A* transmite la información de destino.

Pero todo este proceso, en cuanto a la forma de transmitirlo ha ido evolucionando a través del tiempo, ya que las necesidades han sido más complejas y sobre todo el manejo de información mayor a la que se manejaba anteriormente.

En la actualidad los alambres de cobre continúan proporcionando un medio dominante en las conexiones sobre los cuales muchos mensajes son transmitidos. Los alambres están cubiertos con un blindaje o una cubierta sintética (plástico) que los protege de las condiciones ambientales. Algunos cables contienen más de 2,000 pares de alambres.

En un principio (1927), las conexiones de llamadas telefónicas de larga distancia de un continente a otro se efectuaron cruzando el mar. Para implantar este servicio, los cables estaban colocados en el fondo del océano. El primer sistema de este tipo enlazó a Norte América y la Gran Bretaña. Desde entonces, los cables han sido colocados en el Atlántico, el Pacífico, en Golfo de México y en el Caribe.

Los cables coaxiales multiplican el número de conversaciones que pueden ser transmitidas sobre un circuito en el mismo tiempo. Los sistemas de cables coaxiales acarrear ondas eléctricas sobre una banda de frecuencia, las cuales se expanden cientos de veces para proporcionar un número correspondiente de trayectorias de voz. Un cable coaxial consiste de un número (usualmente 8, 12 ó 20) de tubos de cobre, con un diámetro similar a una pluma fuente, cada tubo contiene un alambre de cobre.

Las conversaciones telefónicas también pueden transmitirse por microondas satelitales, en este tipo de transmisión, los satélites alcanzan órbitas espaciales y reciben señales de microondas dirigidas a la estación terrena. Pero debido a la gran distancia que existen entre la tierra y el satélite en la órbita geoestacionaria, provoca un retardo de 250 milisegundos, siendo éstos en cierto tipo de aplicaciones no adecuados.

Como resultado de la invención del láser y del desarrollo de la fibra óptica surge una nueva alternativa para los sistemas de larga distancia, los cuales pueden transmitir voz por medio de un haz de luz producido por el láser. Los cables de fibra óptica están hechos de cristal de silicio tan delgados como el cabello humano, pudiendo transmitir 8,000 conversaciones de voz simultáneamente. Las fibras ópticas son menos voluminosas, ligeras y más flexibles que un alambre de cobre, siendo ésta una alternativa viable a los tradicionales alambres de cobre y cables coaxiales en redes de comunicaciones por un par de éstas.

INTRODUCCION

1.2 DESCRIPCION DE ENLACES DE LARGA DISTANCIA TELEFONICA

Los enlaces de larga distancia telefónica permiten la intercomunicación entre las personas sin importar en que parte del mundo se encuentren, facilitando el desarrollo a los seres humanos, cualquier actividad relacionada con la sociedad misma, como si estuvieran reunidas en el mismo sitio físico.

Desde luego que lo anterior no sería hoy posible si no se hubiera recurrido a la explotación de la tecnología disponible y al natural interés humano por superarse así mismo y seguir desarrollando nuevas herramientas para su propio bienestar.

Nadie hubiera podido imaginar el desenlace de la telefonía mundial, ahora disponible a millones de personas, cuando se inició la telegrafía hace ya más de siglo y medio, cuyo avance permite intercambiar información entre las comunidades internacionales como no lo había hecho la humanidad en toda su existencia anterior.

Actualmente esta comunicación de larga distancia se lleva a cabo mediante técnicas digitales, lo que permite tener una calidad inmejorable y grandes posibilidades de seguir desarrollándose, a una velocidad aún mayor de lo que hemos conocido hasta ahora. Dentro de los servicios con que se pueden contar hoy día se pueden mencionar los siguientes:

- Telefonía
- Facsimil
- Teletexto
- Video
- Teleservicios
- Red Satelital

Esto no sería posible sin una infraestructura tecnológica compuesta de los siguientes dispositivos:

- Sistemas de transmisión por fibra óptica
- Codificadores de señales
- Circuitos integrados LSI
- Multiplexores de alta velocidad
- Centrales de propósitos específicos

Los principales elementos que hacen posible un enlace de larga distancia telefónica, son:

- Una red local de distribución, cuya función es la de conectar a los usuarios
- Sistemas de conmutación, necesarios para enrutar las comunicaciones a su destino
- Sistemas de transmisión, para interconectar conmutadores

Para permitir los enlaces de larga distancia, los anteriores elementos están en función de una jerarquía: local, regional, nacional e internacional.

La organización técnica de una red telefónica se muestra en la figura 1.2

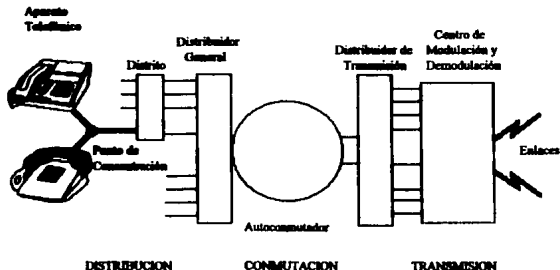


Figura 1.2 Principales elementos de comunicación en una red telefónica

INTRODUCCION

Los tipos de redes necesarios para soportar los requerimientos actuales, son básicamente de tres tipos; difusa, colectiva, y conmutada. La figura 1.3 ilustra lo anterior.

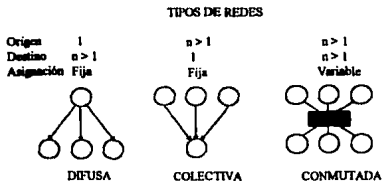


Figura 1.3 Tipos de redes de acuerdo a fuentes de origen y destinos

Asimismo es útil conocer que existen básicamente tres topologías de red, que se pueden combinar de diferentes formas, ver la figura 1.4

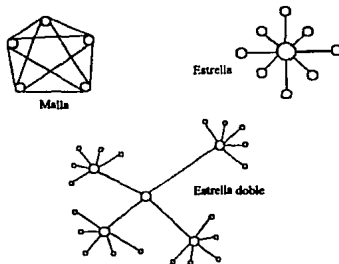


Figura 1.4 Tipos básicos de redes telefónicas

PBX PRIVATE BRANCH EXCHANGE
 RDI INTEGRATED DIGITAL NETWORK
 RTP PUBLIC TELEPHONE NETWORK
 MX MULTIPLEXOR
 DACS DIGITAL ACCESS CROSS CONNECT
 TANDEM HIGHER LEVEL C.O.
 F.O. FIBER-OPTIC
 RSU REMOTE SERVICE UNIT
 CALD AUTOMATIC LONG-DISTANCE C.O.
 ETO LINE OPTICAL TERMINAL EQUIPMENT
 GSDN GLOBAL SOFTWARE DEFINED NETWORK

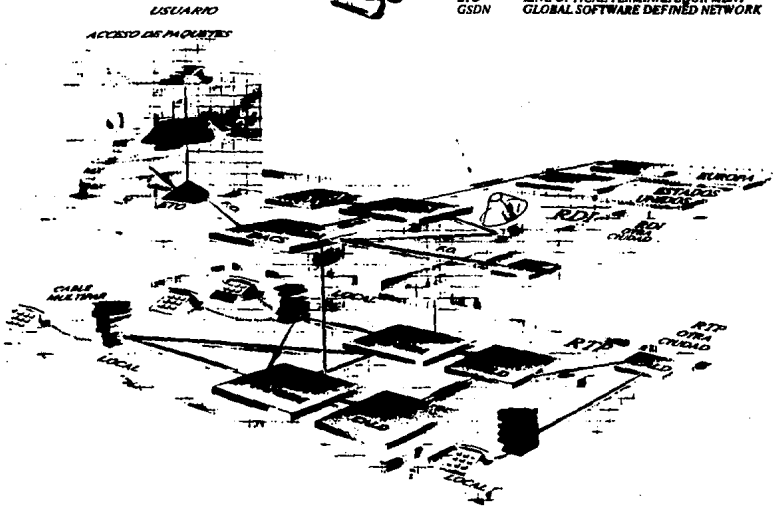


Figura 1.5 Estructura General de la Red Telefónica

INTRODUCCION

La estructura jerárquica de telefonía en México consta de centros: locales, de zona, de área, y regionales. Por lo que para comprender la estructura de la red telefónica en general, se debe tomar en cuenta que existe la siguiente combinación de redes y centros telefónicos, para efecto de enlazar las comunicaciones de larga distancia, como lo muestra la figura 1.5.

Dadas las características de la evolución, requerimientos y necesidades futuras de los enlaces de larga distancia, es fácil comprender la cada día más extendida utilización de las fibras ópticas como medio de transmisión, las cuales se requieren para la interconexión de bancos de canales o multiplexores los que permitan manejar velocidades de transmisión altas lo que facilita la integración de manejo de datos entre equipos de cómputo.

Por lo anteriormente mencionado, es comprensible que la evolución en comunicación telefónica de larga distancia sea un factor que debe explotarse aún más en nuestro país si consideramos el inminente reto de la globalización mundial, en todos los órdenes, del que México no es, ni puede ser ajeno.

1.3 TENDENCIAS Y APLICACIONES FUTURAS

La gran demanda de medios de comunicación rápidos y efectivos han hecho que los gobiernos de América Latina se preocupen por darle prioridad en los presupuestos gubernamentales a todo lo referente en materia de comunicaciones. Los parámetros en los que se basaron para tomar tal decisión son los siguientes:

- Las migraciones y el consecuente crecimiento de las ciudades
- La modernización de las regiones y demanda por tecnología avanzada
- La inversión de las empresas en equipos y tecnología para asegurar mayores utilidades

Las perspectivas de crecimiento en un lapso de 6 años (1992-1998) son de alrededor de casi un 30% anual, superior a cualquier otra región en el mundo; señalando a México y Brasil como países líderes, seguidos por Argentina y Chile (Figura 1.6). Analizando algunos de los programas internos de desarrollo de los países latinoamericanos, como los proyectos de interconexión de América con Europa y Asia, se confirma dicho diagnóstico. Algunos ejemplos son:

- UNISUR, conecta Brasil, Argentina y Uruguay.
- AMÉRICA 1, conecta Brasil, Venezuela, el Caribe y Norteamérica.
- COLUMBUS II, conecta México, E.U.A. (Florida), Islas Canarias, Portugal e Italia.
- PACIFIC TRANSIT CABLE, conecta Sudamérica con Nueva Zelanda.
- PAN AMERICAN CABLE, conecta Chile con los Estados Unidos.

Estos impulsos hacen que Latinoamérica sea uno de los mercados más atractivos para las firmas extranjeras, en materia de comunicaciones, debido a la falta de mercados nacionales para hacer competencia, además de la disponibilidad de abrir nuevos mercados y romper las barreras comerciales cuando a las decisiones de extender el servicio telefónico. Este crecimiento se ve influenciado por cinco factores, principalmente:

INTRODUCCION

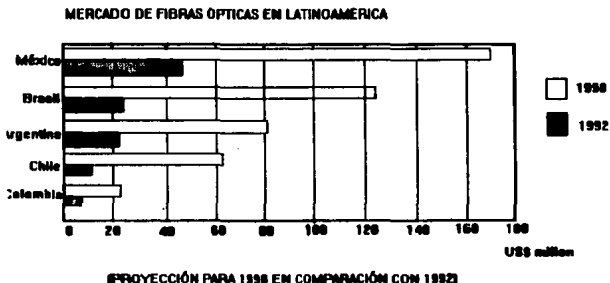


Figura 1.6 Tabla comparativa de la instalación de sistemas de comunicación a través de fibra óptica entre 1992 y su proyección para 1998

- La privatización, que trae capital extranjero y administración, que invierte en calidad de servicios y que tiene como objetivo ganancias de capital.
- La liberalización, que ha facilitado o eliminado reglas impuestas a empresas que suministran equipos y servicios.
- La expansión, que ha resultado del crecimiento de la población y migración a las principales ciudades y ha creado demanda para las comunicaciones.
- La modernización en esta región, que exige equipos de avanzada tecnología, especialmente sistemas de fibras ópticas para incremento de la capacidad de transmisión.
- Los sistemas submarinos, que dan acceso a mercados internacionales, estimulando así la economía y aumentando los ingresos.

En el mapa de la figura 1.7, se muestran las principales conexiones terrestres de larga distancia y los sistemas de cables submarinos de fibra óptica que se han planeado e instalado. El cálculo hecho de la inversión que llevarán esta conexiones pasara por mucho los 1.5 mil millones de dólares, lo que conlleva un mayor incremento comercial y un desarrollo económico en los países participantes.

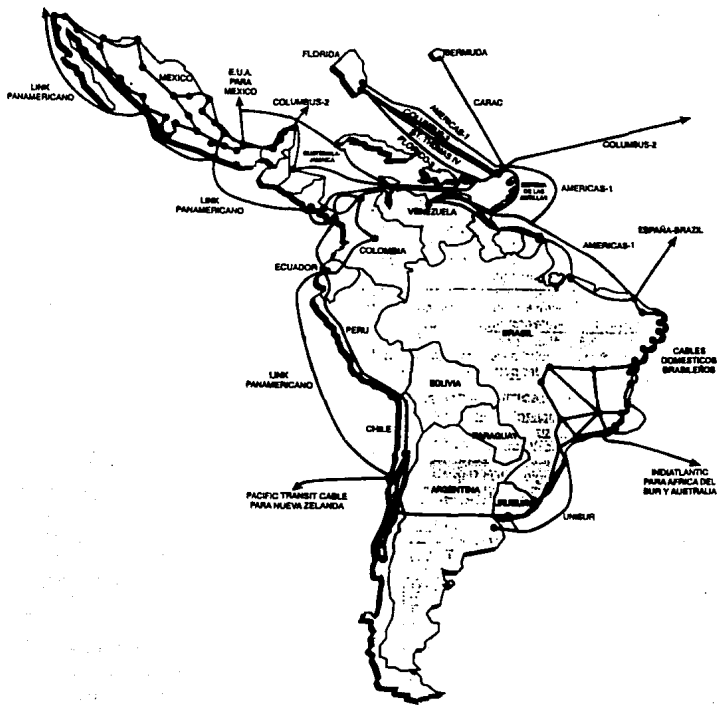


Figura 1.7 Enlaces Terrestres de Larga Distancia en Latinoamérica

INTRODUCCION

Servicio locales y de larga distancia

México planea invertir 13 billones de dólares de los cuales el 35% de este gasto será para productos importados y servicios. Las tendencias para llevar a cabo la modernización son :

- Aumentar la capacidad de interconexión de las centrales.
- Convertir las líneas actuales analógicas a digitales.
- Cambiar los teléfonos a digitales.
- Instalación de conmutadores digitales.
- Creación de avanzados centros de tráfico con capacidad para 1,400 posiciones de operativos digitales.
- Instalar 100,000 cabinas de teléfonos públicos donde la mayoría sea específicamente para tarjetas.
- En las zonas rurales, dar servicio telefónico a todos los poblados de más de 500 habitantes.
- En las ciudades de más de 2,500 habitantes instalar un conmutador automático.

Los avances actuales

Servicio celular. Introducido en 1989, cuenta con más de 140,000 usuarios en 69 ciudades. Su rápido crecimiento se debe principalmente a la deficiencia en la telefonía terrestre.

Transmisión de microondas. Actualmente TELMEX cuenta con equipo de microondas que cubre 16,500 Km en 6,000 ciudades y poblados incluyendo algunas ciudades de E.U.A., existen 110 estaciones terminales y 235 estaciones repetidoras. Muchos negocios e instituciones gubernamentales prefieren el uso de microondas, con servicios propios.

Red digital y fibras ópticas. La Red Digital Integrada (RDI) de tres años de edad, ofrece transmisiones de datos a alta velocidad (arriba de los 64 Kbps.). Se calcula que 5 millones de líneas analógicas obsoletas han sido convertidas a digitales. La RDI está siendo complementada por una red de fibra óptica de 13,500 Kilómetros (instalados para 1994).

Equipo multiplexor remoto se está instalando donde es necesario hacer la conexión de usuarios con el sistema central. Asimismo se están suministrando multiplexores digitales programables utilizando sistemas de líneas ópticas con protección de interruptor.

Proyecto de fibra submarina. En el COLOMBUS-II, cable trasatlántico submarino están participando en su construcción e instalación un grupo de compañías extranjeras de telecomunicación (AT&T, Telefónica de España, Italcable y Compañía Portuguesa Radio Marconi) asociadas con TELMEX cuyo proyecto para poner en funcionamiento esta programado para Diciembre de 1994. El COLOMBUS-II conectará Cancún, en México; Palm Beach, U.S.A.; Islas Canarias, España; Isla Madeira, Portugal; y Palermo, Italia. El total del cableado será de 12.3 mil Km, con capacidad de 23 mil canales, que permitirán transmitir 90 mil conferencias simultáneamente. Esto representa un incremento del 400% con respecto a la capacidad y velocidad disponible actualmente. La tecnología digital del láser permitirá asegurar inmunidad a las interferencias y operación a la velocidad de 565 Mbps en cada par de fibras ópticas, es decir, aproximadamente ocho mil canales por cada fibra.

Con el proyecto del COLUMBUS-II México entra en la red global de fibras ópticas de cobertura mundial con posibilidad de interconexión con países de Centro y Sudamérica. La transmisión de datos, imagen, video, etc. permitirá conectividad punto a punto para utilizar los servicios integrados RDSI (Red Digital de Servicios Integrados).

Transmisión vía Satélite. Las comunicaciones vía Satélite son actualmente el soporte principal de la comunicaciones en México, suministrando televisión, radiodifusoras, teléfono y transmisión de datos aún en áreas aisladas. Casi todas las llamadas de larga distancia de México fuera de norte América son manejadas por medio de satélite. La red de satélite de México (perteneciente y operada por el gobierno) consta de dos satélites, el MORELOS I y II, un equipo de 237 terminales de satélite doméstico, cinco estaciones de tierra del Atlantic Ocean INTELSAT y una estación de tierra del Pacific Ocean INTELSAT. Debido a que estos dos satélites están en los límites de su máxima capacidad se ha contratado la construcción de la segunda generación en la red de satélites conocidos como SOLIDARIDAD, la cual consta de dos satélites idénticos también con un equipo fundamental asociado. Los nuevos satélites brindarán transmisión de voz, datos facsimil, radiodifusoras, y una red de servicios de negocios con México hacia América Central y del Sur.

México está haciendo todo lo necesario para mejorar la calidad de las telecomunicaciones dando al usuario un servicio rápido y confiable. Para lograr estos objetivos, TELMEX está desarrollando laboratorios de investigación y centros de operaciones de pruebas. Además de que cuenta con personal altamente calificado para dar el mejor servicio al cliente.

INTRODUCCION

Desarrollo de nueva tecnología en comunicaciones

La fibra oscura (dark fiber), es una fibra que no necesita instalarle amplificadores electrónicos, empieza su tendencia como la primera etapa del super envío de datos, probándose en Europa y Estados Unidos de Norteamérica.

Tras de haber sido guardado este proyecto por largo tiempo, la revolucionaria tecnología de la fibra transparente es ahora una realidad. Este trabajo no solo hace posible la avanzada tecnología de la fibra sino que también, cumple con las demandas del mercado con costos competitivos para su comercialización.

La tecnología de la red óptica transparente (transparent optical networks) de bajo costo y un ancho de banda muy alto, reemplaza los repetidores electrónicos por amplificadores ópticos. Hoy en día los repetidores electrónicos convierten la señal óptica detectada en una señal eléctrica, la cual es amplificada y dirigida al amplificador láser, cumpliendo así con la tarea de regenerar la señal óptica para el siguiente tramo de fibra. Esto restringe el ancho de banda de la señal por las limitantes que presentan los circuitos electrónicos.

En contraste, los amplificadores ópticos elevan el rango de longitud de onda de la señal, al no intervenir la conversión del foto-electrón. Lo más revolucionario de estos sistemas es la simplicidad para enviar datos por medio de la fibra óptica, ya que los amplificadores ópticos pueden estar a distancias de más de 50 Km.

1.4 REQUERIMIENTOS ACTUALES

Debido a que las necesidades actuales de comunicación exigen un mejor servicio a nivel local como a nivel internacional, tales como la transmisión de voz, datos e imágenes, éstos plantean una alternativa de mejorar e integrar todos los servicios existentes.

En los sistemas de comunicación por fibra óptica uno de los aspectos importantes es mejorar hasta un 100% los servicios que se le proporcionan al usuario, es decir, aumentar de manera eficiente el número de teléfonos, ya que en la actualidad se tiene un teléfono por cada diez habitantes.

Otra de las necesidades de una comunicación por fibra óptica es poder integrar los servicios tales como, correo de voz , buzón electrónico, correo de fax, transmisión de datos, de voz y de imágenes. Todos éstos con el fin de obtener una mejor confiabilidad, rapidez y sobre todo mayor eficiencia en los mismos.

Hoy en día las redes satelitales presentan una estructura bien definida, capaz de tener tiempos de respuesta mínima, un medio de transmisión de alta calidad punto a punto y un mínimo promedio de errores.

Pero con el desarrollo de la comunicación por fibra óptica, todas estas características pueden ser mejoradas y más aún ser capaces de reducir cualquier tiempo de respuesta y sobre todo reducir las pérdidas en la trayectoria, pudiendo así mejorar estos aspectos e integrar los servicios existentes de un forma eficaz.

La avanzada tecnología de la fibra óptica, facilita y optimiza a la vez, su mantenimiento y confiabilidad, cumpliendo de esta manera uno de los requerimientos principales, mejorar el servicio.

INTRODUCCION

2. COMUNICACIONES DIGITALES

2.1 CONCEPTOS BASICOS DE COMUNICACIONES DIGITALES

La necesidad de transmitir grandes cantidades de información a larga distancia aumenta a medida que progresa el desarrollo humano y tecnológico. Es difícil imaginar como sería la vida moderna sin el fácil acceso a medios de comunicación confiables, económicos y eficientes. Es por esto que los sistemas de comunicación se hallan donde quiera que se transmite información de un punto a otro.

La investigación constante en el desarrollo y evolución de los sistemas de comunicación han generado la búsqueda del perfeccionamiento en los medios de comunicación, cuyas principales motivaciones, entre otras, son:

- Mejorar la fidelidad en las transmisiones
- Incrementar la velocidad de transferencia de información
- Incrementar la distancia entre repetidores

En este trabajo se considera la transmisión de información a través de distancias relativamente largas (telecomunicaciones), para lo cual, se emplean señales electromagnéticas (la luz pertenece a esta clase dado que está ubicada dentro del espectro electromagnético), esto debido a que son relativamente fáciles de controlar y viajan a la velocidad de la luz o cercana a ésta.

Este capítulo se dedica al estudio de los principios básicos de los sistemas de comunicaciones, principalmente digitales, sus elementos y las formas en que se procesa la información para poder ser transmitida; asimismo, se definen algunos conceptos básicos.

COMUNICACIONES DIGITALES

2.1.1 Sistemas de comunicación

Todos los sistemas para transmisión de información contienen, de manera invariable, tres sistemas principales:

- Transmisor
- Canal
- Receptor

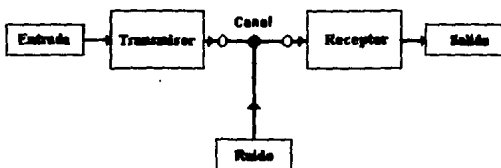


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones

El transmisor tiene como función procesar el mensaje a ser transmitido, modificarlo y convertirlo en una señal eléctrica u óptica, de tal modo que pueda enviarse a través del canal que funge como medio de comunicación. El receptor se encarga de recibir dicha señal, convertirla y modificarla para recuperar el mensaje original (Figura 2.1).

La información o mensaje a transmitir, es parte importante en un sistema de comunicación, así como las modificaciones que sufre para poder ser enviada de un lugar a otro.

2.1.2 Señales de comunicación

Los sistemas de comunicaciones eléctricas involucran necesariamente la transmisión y recepción de señales. Una señal se define como un nivel eléctrico (voltaje o corriente) que varía con respecto al tiempo y es utilizada para llevar un mensaje o información de un punto a otro. La información se presenta bajo la forma de diversas señales que tienen un significado preciso para el emisor y para el receptor. Las señales pueden tomar una forma particular, como puede ser información alfabética, numérica o simbólica, incluyendo símbolos alfanuméricos de código binario, códigos de control, entre otros; cuyo sentido lo conoce tanto el emisor como el receptor.

Las comunicaciones digitales se definen como el proceso de transferir información digital (generalmente de forma binaria) entre dos o más puntos. Es importante señalar que tanto en la fuente como en el receptor, la información está en forma digital. Mientras que durante la transmisión, la información puede estar en forma digital o analógica.

2.1.3 Tipos de señales

Las señales de comunicación pueden ser transmitidas fundamentalmente de dos diferentes formas:

- Señales continuas analógicas
- Señales discretas digitales

El nivel de las señales analógicas varía continuamente con respecto a el tiempo y en las digitales su variación en el tiempo es en forma discontinua. Una señal digital solo puede tener un cierto número de niveles, el número más común es el dos, formado con señales en código binario, es decir, nivel cero y nivel uno.

Las señales analógicas generalmente representan la variación de una cantidad física, por ejemplo un onda de sonido o cualquier onda senoidal. Las señales digitales consisten básicamente de pulsos los cuales ocurren en intervalos discretos de tiempo (figura 2.2). Los pulsos pueden presentarse de forma simple en determinado periodo de tiempo o en grupos, en forma de códigos, como el telegrama.

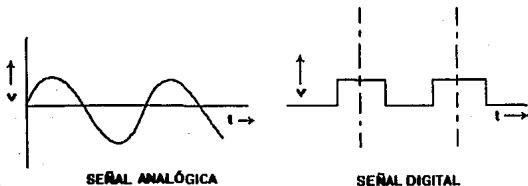


Figura 2.2 Tipos de señales

Cada forma tiene sus ventajas, la tecnología analógica es más compatible con la gente, nuestros oídos, por instantes, detectan las continuas variaciones en los niveles de sonido, no solamente la presencia o ausencia de sonido, nuestros ojos igualmente detectan niveles de brillo, no solamente la presencia o ausencia de luz, por esta razón las comunicaciones de audio y video están representadas tradicionalmente en forma analógica.

La transmisión digital tiene unas ventajas fundamentales si se la compara con la tecnología analógica: puesto que una señal digital solamente puede tener valores discretos determinados (en el caso más simple solamente dos), esta señal digital puede librarse por medio de amplificadores regeneradores casi totalmente de las interferencias causadas por el ruido o por la diafonía, las cuales se van sumando a la señal a lo largo de la ruta de transmisión, lo cual no sería posible con una señal analógica. Esta gran ventaja hace que la tecnología digital se pueda instalar incluso bajo circunstancias de transmisión más desfavorables.

Si en el transcurso de la transmisión se falsea un elemento de la señal, se produce un bit de error y, a consecuencia de la regeneración que se hace a tramos regulares, se van sumando solamente bits erróneos, no los ruidos. La tasa de bits de error (BER) tendrá que mantenerse, por lo tanto, tan pequeña como sea posible.

2.1.4 Espectro electromagnético

Es importante mencionar el espectro de frecuencias electromagnéticas para saber en que rango es transmitida una señal. En la figura 2.3 podemos observar que el espectro de frecuencias va desde las frecuencia subsónicas (de pocos Hertz) hasta los rayos cósmicos (10^{22} Hz) El espectro de frecuencias de luz se divide en tres grandes regiones que comprenden la región óptica Para esta región se acostumbra especificar la banda de interés en términos de longitud de onda en lugar de la frecuencia:

- Infrarrojo: banda de longitud de ondas de luz muy largas (luz no visible, 100 m).
- Visible: banda de longitud de onda visible al ojo humano comprendida entre 390 y 770 nm
- Ultravioleta: banda de longitud de onda muy cortas (luz no visible, 50 nm)

Cuando se expresa en términos de ondas electromagnéticas de ultra frecuencia, como la luz, es común expresar el rango de frecuencia en términos de longitud de onda. La frecuencia de onda se define como la longitud de una onda en un ciclo que ocupa en el espacio una onda electromagnética. El tamaño de la longitud de onda depende de la frecuencia de la onda y de la velocidad de la luz. Matemáticamente se define:

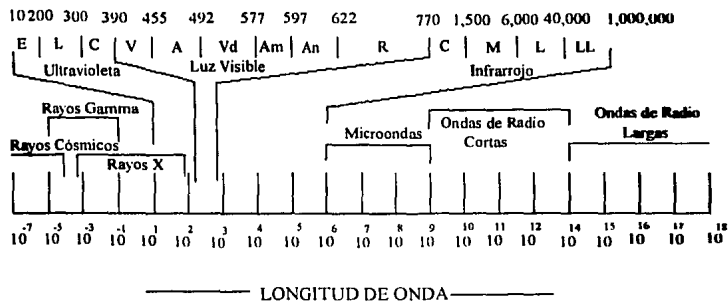
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

donde:

λ = Longitud de onda (m)

c = Velocidad de la luz (300,000,000 m/s)

f = Frecuencia (hertz = ciclo/seg.)



Ultravioleta:

E = Extremo

L = Lejano

C = Cercano

Luz Visible:

V = Violeta

A = Azul

Vd = Verde

Am = Amarillo

An = Anaranjado

R = Rojo

Infrarrojo:

C = Cercano

M = Medio

L = Lejano

LL = Lejano Lejano

Figura 2.3 Espectro Electromagn3tico

2.2 CONCEPTOS DE TELECOMUNICACIONES

Telecomunicación se define como la transmisión a distancia de información mediante cualquier sistema electromagnético: conductores eléctricos, radioeléctricos u ópticos entre otros.

2.2.1 Transmisión de datos

Normalmente el término "Transmisión de Datos" se utiliza para describir el traslado de información codificada sobre algún sistema de comunicación, empezando en el transmisor del sistema y con destino en el receptor, a través de un medio físico conocido como "Medio de Transmisión".

Para transmitir un mensaje es necesario que sus elementos sean acomodados de tal forma que sea posible su recepción con la menor incertidumbre posible. Para poder determinar el mejor medio de transmisión en un enlace determinado, es necesario evaluar sus características con respecto a los siguientes parámetros: disponibilidad, confiabilidad, velocidad, distancia, costos, mantenimiento y facilidad de implementación.

2.2.2 Modos de transmisión

Existen cuatro maneras posibles de realizar la transmisión de datos sobre un canal: simplex, semi-duplex, duplex completo y duplex completo/completo.

Simplex. La operación simplex implica que la transmisión de datos se efectúa en un solo sentido, es unidireccional. Por lo que las líneas simplex de transmisión también son llamadas solo-recepción, solo-transmisión o un-solo-camino.

Semi-duplex. El modo semi-duplex (HDX Half duplex) permite la transmisión en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo, por lo mismo es llamado también dos-caminos alternados (o either way lines).

Duplex completo. En el modo duplex completo (FDX Full duplex) la transmisión puede ser en ambas direcciones simultáneamente, pero solamente puede ser entre las mismas dos estaciones de comunicación. Las líneas duplex-completo también son llamadas dos-caminos-simultáneos, duplex (o both way lines).

Duplex completo/completo. En el modo duplex completo/completo (F/FDX Full/full duplex) la transmisión es posible en ambas direcciones simultáneamente pero no solamente entre las dos estaciones transmisor-receptor, es decir una estación transmite a una segunda estación y recibe de un tercera estación al mismo tiempo. El modo F/FDX es posible solo en circuitos multipuntos. Un factor muy importante que influye en el desempeño de los enlaces para transmisión de datos es la velocidad de transmisión. Esta velocidad es a la cual se transmiten los datos sobre una línea de comunicación. Las unidades que se utilizan para medir esta velocidad son los bauds o baudios, definidos como el número de eventos discretos por segundo que ocurre sobre un circuito de comunicación.

2.2.3 Sistemas de transmisión de datos

Los sistemas de transmisión de datos son básicamente de dos tipos: sistemas de canal sencillo y sistemas multicanal.

Sistemas de canal sencillo. En este tipo de sistemas solo puede ser transmitido un mensaje a la vez a través de una misma conexión física. Por lo que, si se tienen mayores requerimientos de transmisión, el número de conexiones se debe incrementar para satisfacer la demanda de comunicación.

Sistemas multicanal. En este tipo de sistema se transmite un tráfico simultáneo en varios canales por el mismo conductor, o medio físico, generalmente son utilizados en aplicaciones de telefonía y computación. Los sistemas multicanal ofrecen una capacidad de tráfico muy alta en un área física muy pequeña (cables). Esto implica a su vez, de un equipo terminal especial y para las conexiones más largas, se necesitan estaciones de amplificación colocadas a intervalos regulares.

Los sistemas más comunes son el Sistema de Frecuencia Portadora sobre cables coaxiales, y el Sistema de Modulación por Pulsos (PCM) sobre cables multipares y coaxiales. El sistema de fibra óptica es cada vez más común, especialmente para conexiones de punto a punto en larga distancia, por la demanda de capacidad tan alta.

Los Sistemas de Frecuencia Portadora son considerablemente más poderosos. Estos están basados en una mezcla de señales originales, moduladas con varias frecuencias portadoras, de tal manera que se pueden acomodar una sobre otra en términos de frecuencia. Como estos sistemas utilizan la división de frecuencia se les denomina Multiplexaje por División de Frecuencia (FDM).

Los sistemas PCM cortan cada señal en un gran número de periodos, los cuales pueden ser detectados electrónicamente y codificados por medio de pulsos digitales; estos son comprimidos junto con los pulsos de otras señales y transmitidos a una gran velocidad a través de cables multipares, coaxiales, microondas o fibras ópticas. Ya que estos sistemas funcionan por división de tiempo, son llamados Sistemas de Multiplexaje por División del Tiempo (TDM).

En un sistema de fibra óptica las señales son transmitidas en forma de pulsos de luz a lo largo del conductor, por lo que no difieren grandemente del sistema PCM (digital) para cables coaxiales que transmite pulsos eléctricos.

Para los sistemas de telecomunicaciones, donde se manejan distancias muy grandes (superiores a 1 Km entre emisor y receptor), los sistemas multicanal resultan los más apropiados debido a que optimizan el costo y aumentan el rendimiento.

2.2.4 Problemas para la transmisión

Cuando una señal se transmite a través de un canal de comunicaciones está sujeta a una variedad de factores que pueden afectarla, en consecuencia la información de dicha señal se puede alterar o incluso perder. Los factores más importantes que pueden afectar a la señal son: limitación de ancho de banda, atenuación, distorsión por retardo, ruido.

Limitación de ancho de banda. Si alguna señal que supera la capacidad de un cierto canal se intenta transmitir por éste, el resultado será la pérdida de información en la transmisión.

Capacidad de un canal. R. Hartley, en 1928, desarrolló una relación útil entre el ancho de banda, el tiempo de transmisión y la capacidad del canal en bits,

$$H \propto BT \quad (2.2)$$

donde:

H = Capacidad del canal en bits

B = Ancho de banda del canal

T = Tiempo de transmisión

COMUNICACIONES DIGITALES

La cual establece que el ancho de banda requerido para transmitir información a cierta velocidad es proporcional a la velocidad de transmisión.

Tomando en cuenta el ruido del canal, Shannon y Hartley (1948), desarrollan una fórmula para obtener la capacidad del canal:

$$C = B \log_2(1 + s/n) \quad (2.3)$$

donde:

- C = Capacidad del canal en bits/seg.
- B = Ancho de banda del canal
- s/n = Relación de potencia de la Señal y el Ruido

El teorema de Shannon-Hartley da un límite, que no puede ser excedido por la velocidad de la señal en un canal en el cual el ruido es puramente aleatorio. Es decir, es posible enviar información a través de un canal "a cualquier velocidad que sea menor que la capacidad del canal y con un error arbitrario muy pequeño", a pesar de la presencia del ruido, siempre y cuando se pueda disponer de un tiempo arbitrariamente largo para la transmisión.

Atenuación. A la potencia de una señal que disminuye con la distancia sobre un canal de transmisión se le conoce como atenuación. Para evitar la atenuación de una señal, se debe considerar lo siguiente:

- Una señal recibida debe tener suficiente potencia para que los circuitos electrónicos del receptor puedan interpretarla.
- La señal debe mantener un nivel de potencia mayor que el de cualquier interferencia para que sea recibido sin errores.
- La atenuación es una función inversa de la frecuencia, es decir, señales de mayor frecuencia sufren menor atenuación y la distancia a alcanzar es mayor.

Distorsión por retardo. Es un fenómeno causado por el hecho de que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado (canal físico) varía con la frecuencia.

Es decir, para una señal que se transmite en una cierta banda de frecuencia, al viajar por el medio de transmisión, se descompone en varios elementos de frecuencia que llegan al receptor en diferentes tiempos; la señal recibida resulta entonces distorsionada debido al retardo variable de sus componentes.

Ruido. El ruido se define como aquellos elementos extraños que aparecen en la comunicación y que no eran parte del mensaje original. Cualquier señal que interfiera con el mensaje enviado se considera ruido, y es la causa principal que limita el desempeño de un sistema de comunicaciones. El ruido lo podemos clasificar en: ruido térmico, por intermodulación, diafonía y ruido impulsivo.

Ruido térmico. Al hacer circular una señal eléctrica por un conductor, la agitación térmica de los electrones producen este tipo de ruido. Este ruido está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión y también se le conoce como ruido blanco, el cual no es posible eliminar.

Ruido por intermodulación. Este ruido se produce cuando varias señales transmitidas a diferentes frecuencias comparten el mismo canal de transmisión. El efecto de éste es producir señales nuevas que son el resultado de la suma o diferencia de dos de las señales transmitidas y que pueden interferir con una tercera señal que se transmita a la frecuencia resultante, con la consecuente generación de errores.

Diafonía. Este fenómeno es el resultado de un acoplamiento electromagnético no deseado entre dos canales de comunicación adyacentes, lo que provoca la suma de los campos magnéticos generados por la energía de las señales que viajan por dichos canales, y se traduce en la suma de parte de dichas señales sobre cada canal generándose interferencias.

Ruido impulsivo. Este tipo de ruido no es continuo y consta de pulsos irregulares o picos de ruido de corta duración y relativamente alta amplitud que son generados por una variedad de causas, entre las que se pueden mencionar: perturbaciones electromagnéticas externas al sistema.

Ruido electrónico en la recepción. En un sistema de telecomunicación, la señal/ruido en la detección, es un parámetro fundamental, ya que como se mencionó anteriormente, el ruido que se añade a la señal reduce la calidad de la transmisión. Si el ruido adicional llega a ser igual o superior a la señal, ya no se puede extraer la información; por ende, la relación señal/ruido fija el límite de detección. Es decir, un ruido representa la señal más pequeña que permite recuperar la información con la calidad esperada. Si se conoce el valor del ruido y la relación s/n , se puede deducir el valor mínimo que debe tener la señal para poder asegurar la calidad de transmisión requerida.

2.3 CODIGOS DE COMUNICACION

Un código es un arreglo particular de símbolos o pulsos los cuales representan un cierto carácter o mensaje, en consecuencia la codificación es la secuencia de bits preestablecidos para representar caracteres y símbolos. Así, los códigos de comunicaciones son llamados, códigos de caracteres (character codes), códigos de símbolos (symbol codes) o lenguajes de caracteres (character languages). Existen en esencia, sólo tres tipos de caracteres utilizados en los códigos de comunicaciones: carácter de control de enlace de datos (data link control characters), los cuales son utilizados para facilitar el orden del flujo de datos desde la fuente hasta el destinatario; carácter de control gráfico (graphic control characters), los cuales implican la sintaxis o presentación de los datos en la terminal receptora; y los caracteres alfanuméricos (alphanumeric characters) los cuales son utilizados para representar los diversos símbolos que representan letras, números y signos de puntuación del idioma inglés o español (figura 2.4).

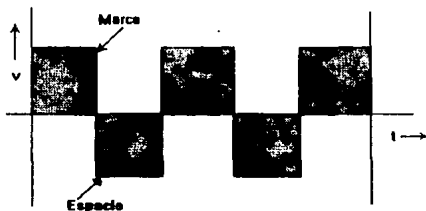


Figura 2.4 Señal codificada representando una secuencia de "1" y "0" alternos

El primer código de comunicaciones más difundido fue el código Morse. El código Morse utilizaba tres símbolos de diferente duración (puntos, rayas y espacios) los cuales representaban caracteres alfanuméricos, signos de puntuación y palabras de interrogación. El código Morse resultaría ser inadecuado para los modernos equipos de comunicación digital debido a que todos los caracteres no tienen el mismo número de símbolos y por lo tanto los tiempos de duración de cada carácter son diferentes también.

Algunos ejemplos de los más comunes códigos de caracteres son : código Baudot, código binario, código ASCII (American Standard Code for Information Interchange).

Código Baudot. El código Baudot, también conocido como código de telex (Telex code), emplea generalmente la operación del teleimpresor. Utiliza un código básico de cinco unidades por cada carácter. Es decir, cada carácter consiste en la combinación de cinco pulsos todos de la misma duración que representan un espacio o una marca. (figura 2.5).

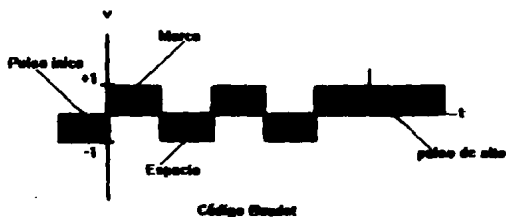


Figura 2.5 Código Baudot: cinco pulsos por carácter; uno y medio de alto

Este código es fácil de mandar debido a que el tiempo requerido para enviar cada carácter es fijo. Para indicar donde ha empezado el código Baudot y sincronizar la información entre el transmisor y el receptor, se utiliza un pulso de inicio (1 unidad) el cual se envía antes del carácter y un pulso de alto (1.5 unidades) después del carácter, por lo que es más correcto decir que es un código de 7.5 unidades. Este código es utilizado ampliamente en telegrafía automática.

Código Binario. Este código se basa en el número binario y es utilizado tanto en el campo de la computación como en el de comunicaciones. Es un código de dos dígitos en los cuales un dígito es el nivel "cero" y otro es el nivel "uno". Como una señal, el nivel cero significa no pulso mientras que el nivel uno significa un pulso. Estos son generalmente llamados dígitos binarios o simplemente bits en los lenguajes de comunicación .

La técnica básica que se aplica en comunicaciones es convertir la información o el mensaje en forma digital. En el caso de una señal analógica (por ej. un onda senoidal simple), la señal puede ser dividida (cuantitativamente) en una serie de niveles, a cada nivel se le designa un número decimal, los cuales son expresados en dígitos binarios a su vez. Esta cuantificación hace posible que una señal compleja pueda ser transmitida en términos de signos elementales de "0" y "1", en forma de código. Esto forma la base del código de pulsos modulados (PCM, pulse code modulation) el cual es muy utilizado en telecomunicaciones.

Una variación del código binario es cuando solamente se utilizan números binarios es el código de codificación binaria decimal BCD (binary coded decimal). Aquí, grupos de dígitos binarios son utilizados para convertir cualquier número decimal en particular, pudiendo expresarse en arreglos de 16 dígitos.

Código ASCII. El código ASCII (American Standard Code for Information Interchange), es utilizado como un estándar en la comunicación de datos. Este código emplea un código de 7 u 8 bits y un bit de paridad y es capaz de definir 128 ó 256 caracteres. Los sistemas de transmisión de datos operan a velocidades cerca de 300 bits/seg. hasta 14.4 kbits/seg., en las redes de teléfonos públicos.

2.4 TRANSMISION DE INFORMACION DIGITAL

La información digital binaria puede ser transmitida de dos diferentes formas: serial o paralela. En la figura 2.6 (a) se muestra un código binario que es transmitido del punto *A* al punto *B* en forma paralela; se muestra que cada bit de posición tiene su propia línea de transmisión y por consecuencia los cuatro bits pueden ser transmitidos al mismo tiempo durante un intervalo de tiempo de un pulso de reloj simple (T). Este tipo de transmisión también es llamado bit paralelo (parallel-by-bit).

La figura 2.6 (b) nos muestra el mismo código binario transmitido en forma serial. Aquí solo existe una sola línea de transmisión, por lo tanto solamente puede ser transmitido un bit a un tiempo. En consecuencia se requieren varios pulsos de reloj para transmitir la palabra completa. Este tipo de transmisión suele llamarse bit serial (serial-by-bit).

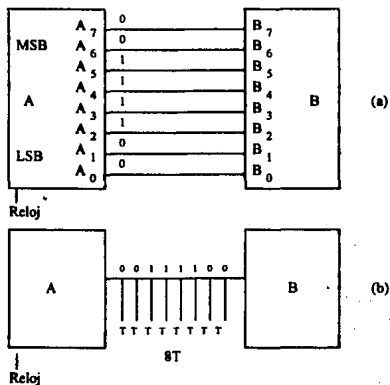


Figura 2.6 Transmisión de información digital de formas: (a) paralela: palabra de 8 bits y (b) serial

Las características que se deben considerar al analizar las transmisiones serial y paralela es la velocidad contra la simplicidad. La transmisión de datos puede ser mucho más rápida utilizando la transmisión en paralelo. Pero por otro lado, la transmisión en paralelo requiere de más líneas entre el transmisor y el receptor. Como regla general, las transmisiones en paralelo son utilizadas para distancias cortas, y en las transmisiones a larga distancia se utilizan las transmisiones seriales.

2.5 SINCRONIZACION

Sincronización significa coincidir o concordar en tiempo, existen cuatro tipos de sincronización: bit o reloj de sincronización, modem o portador de sincronización, carácter de sincronización, y mensaje de sincronización.

Carácter de sincronización. En esencia el carácter de sincronización es el que identifica el principio y el final de un código de caracteres. Existen dos formas de llevar a cabo la sincronización de caracteres: asíncrona y síncrona.

Formato de datos asíncronos. Con datos asíncronos, cada carácter se forma entre un bit de inicio y un bit de fin (start and stop bit). La figura 2.7 nos muestra el formato utilizado para armar un carácter de datos de transmisión asíncronos. El primer bit transmitido es el de inicio (start bit), que generalmente es un "0" lógico. Los bits del código de caracteres son transmitido enseguida comenzando con el LSB bit menos significativo (least significant bit) y continuando hasta el MSB bit más significativo (most significant bit); el bit de paridad (si se utiliza) es transmitido directamente después del MSB. El último bit transmitido es el bit de fin (stop bit), el cual siempre es un "1" lógico.

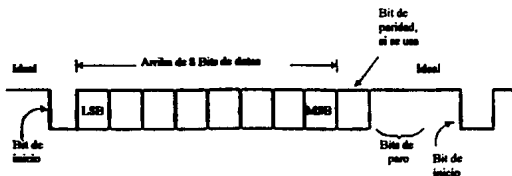


Figura 2.7 Formato de datos asíncronos

Formato de datos síncronos. Con los datos síncronos, en lugar de armar cada carácter independientemente con un bit de inicio y otro bit de fin, un único carácter de sincronización llamado carácter SYN es transmitido al principio de cada mensaje (figura 2.8).

En la comunicación asíncrona no es necesario que el reloj de transmisión y el de recepción estén continuamente sincronizados. Solo es necesario que ellos estén operando aproximadamente en la misma proporción y estén sincronizados al inicio de cada carácter. En la sincronía, el reloj de transmisión y el de recepción deben estar sincronizados debido a que la sincronización de caracteres ocurre solamente al inicio del mensaje.

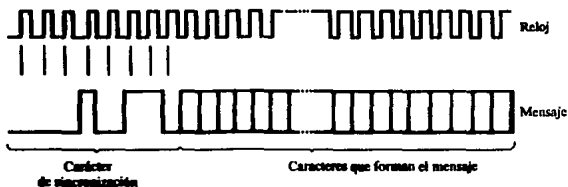


Figura 2.8 Formato de datos síncronos. (Carácter de sincronización SYN)

En la comunicación asíncrona cada carácter tiene 2 ó 3 bits de más (1 bit de inicio y 1 ó 2 bits de alto), estos bits adicionales reducen la eficiencia de la transmisión. En la sincronía se tienen dos caracteres SYN (16 bits de más) agregados al mensaje. Por lo tanto, la comunicación asíncrona es más eficiente para un mensaje corto, y la síncrona es más eficiente para un mensaje largo.

3.5.1 Códigos de líneas

Esencialmente existen cinco factores primarios que deben ser considerados cuando se selecciona un formato de líneas de comunicación:

- Transmisión de voltajes y de la componente de corriente directa DC.
- Tiempo de recuperación.
- Ancho de banda de transmisión.
- Facilidad de detección y decodificación.
- Detección de error.

Transmisión de voltaje y de la componente de corriente directa DC. La transmisión de voltajes o de niveles puede ser de dos categorías: unipolar (UP) o bipolar (BP). La transmisión de datos binarios implica la transmisión de un solo nivel de voltaje diferente de cero ($+V$ para un "1" lógico y $0 V$ o tierra para un "0" lógico). La transmisión bipolar implica dos niveles de voltaje diferentes de cero ($+V$ para un "1" lógico y $-V$ para un "0" lógico). Sobre una línea de transmisión digital, es más eficiente transmitir datos binarios con voltajes iguales en magnitud pero con polaridad opuesta y simétricamente balanceados por $0 V$.

Ciclo de trabajo (Duty Cycle). El ciclo de trabajo de un pulso binario es utilizado para categorizar el tipo de transmisión. Si un pulso se mantiene alto o bajo durante todo el intervalo de tiempo de un bit, es llamado no retorno a cero (NRZ). Si un pulso binario se mantiene alto menos del 100% del intervalo de tiempo de un bit, es llamado retorno a cero (RZ). Las transmisiones unipolares, bipolares, retorno a cero (RZ) y no retorno a cero (NRZ) pueden combinarse en diferentes formas para poder llevar a cabo un esquema en particular de diferentes líneas de transmisión. En la figura 2.9 se muestran cinco diferentes posibilidades.

En la figura 2.9, los dos primeros incisos utilizan el 100% del ciclo de trabajo por cada bit unitario. En el inciso (a) esta representado la señal de un código de línea unipolar de no retorno a cero UPNRZ (unipolar non return-to-zero), dado que existe un solo nivel de voltaje que representa el uno binario ($+V$) y el voltaje 0 representa el cero binario. El inciso (b) tiene dos voltajes diferentes de cero cuya representación se interpreta como: $+V =$ nivel "1" y $-V =$ nivel "0", por lo tanto se representa una señal bipolar de no retorno a cero BPNRZ (bipolar non return-to-zero).

En los tres últimos incisos cada unidad de bit permanece activa sólo el 50% del ciclo de trabajo. En el inciso (c) sólo existe un nivel de voltaje, $+V =$ "1" lógico, por lo tanto representa una señal unipolar de retorno a cero UPNRZ (unipolar return-to-zero). El inciso (d) representa una señal bipolar de retorno a cero BPRZ (bipolar return-to-zero), dado que existen dos niveles de voltaje diferentes de cero ($+V =$ nivel "1", $-V =$ nivel "0"). Y en el inciso (e) también existen dos niveles de voltaje diferentes de cero, pero aquí el "1" lógico esta representado por ambas polaridades ($+V$ y $-V =$ nivel "1") y el cero lógico por el voltaje en cero ($0 V =$ nivel "0"). Este método se llama Inversión de Marcas Alternas AMI (alternate mark inversion). En la transmisión AMI, cada sucesión de "1" invierte su polaridad con respecto al anterior. Debido a que se utiliza el retorno a cero esta técnica suele llamarse inversión de marca alterna bipolar retorno a cero BPRZ-AMI (bipolar-return-zero- alternate mark inversion).

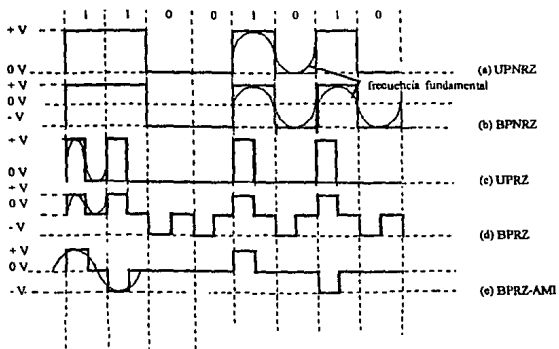


Figura 2.9 Códigos de línea

Códigos HDBn (High Density Bipolar of order n). Estos códigos son “códigos AMI modificados”, en los cuales la regla de la alternancia de polaridad de impulsos consecutivos es violada intencionalmente: en el caso de que en la señal binaria se presenten más de n bits cero consecutivamente, se inserta un impulso I' (impulso de violación), que tiene la misma polaridad que tenga el bit precedente, figura 2.10(c). Mediante el impulso I' se consigue que un receptor de señales pueda extraer también el reloj incluso durante secuencias de ceros prolongados, de tal forma que cumpla la transparencia de las secuencias de bits (secuencia binaria).

Códigos BnZS (Bipolar with Zeros Substitution) son otros códigos en los cuales se sustituyen grupos de n bits “0” por grupos con elementos de señal que contienen impulsos I ; son utilizados:

- El código B6ZS en el cual se sustituyen un grupo de seis ceros consecutivos por: $0 +I' -I' 0 -I' +I'$ (donde “+I'” representa a un impulso positivo y “-I'” a un impulso negativo), en el caso de que el impulso precedente fuese positivo y por $0 -I' +I' 0 +I' -I'$ si fuese negativo.

- El código **B8ZS** en donde se sustituye un grupo de ocho zeros consecutivos por: $000 +V -V' 0 -V' +V$, en el caso de que el impulso precedente fuese positivo y por $000 -V' +V' 0 +V -V'$ si éste fuese negativo.

Código CMI (Code Mark Inversion). Es un código de interfaz binario, figura 2.10 (d), en el cual los bits "1", alternan en su polaridad, mientras que los bits "0" son negativos en la primera mitad del intervalo de tiempo del bit y positivos en la segunda mitad.

Código 4B3T. En este código se reemplaza un grupo de cuatro bits por tres elementos de señal ternarios, para desplazar el espectro de la señal hacia frecuencias más bajas, figura 2.10(e).

Código 5B/6B. Las fibras ópticas tienen otros requerimientos puesto que en ellas se presentan solamente dos estados de la señal (hay luz/no hay luz). El código de línea que se emplea para este caso es el 5B/6B, con el cual se puede conseguir la transparencia de bits así como depositar informaciones adicionales de supervisión: cada 5 bits de la señal binaria original son sustituidos por 6 bits de la señal de línea NRZ.

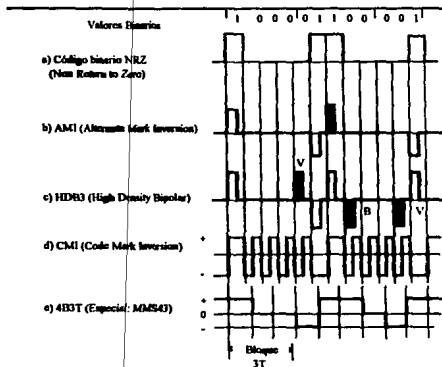


Figura 2.10 Códigos de línea

El método de codificación de línea determina el ancho de banda mínimo requerido para la transmisión, permite extraer el reloj de sincronización, la facilidad de decodificarlo, elimina el nivel promedio de corriente directa DC, y detectar errores de la forma más conveniente.

2.6 TIPOS DE MODULACION DIGITAL

2.6.1 Transmisión de señales

La señal eléctrica suele tener una forma compleja, sin embargo, el matemático Fourier mostró que toda señal periódica cualquiera que sea su complejidad, puede descomponerse matemáticamente en una suma de señales senoidales y cosenoidales. Por tanto, toda señal compleja posee una componente de frecuencia más baja, llamada frecuencia fundamental, y un número elevado de componentes de frecuencias más altas. Todas las frecuencias superiores tiene la propiedad de ser múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, no todas las armónicas están presentes forzosamente. Cada armónica tiene una amplitud relativa que depende de la forma de la señal compleja original.

Si se conoce la frecuencia fundamental y la frecuencia de una señal compleja de la armónica más alta, es posible definir la banda de frecuencia necesaria para reconstruir la señal compleja. El ancho de banda es la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja (frecuencia fundamental).

Todo aparato electrónico debe actuar sobre la señal compleja sin modificar ninguno de los componentes (frecuencia fundamental y armónicas), unos con respecto de otros.

Por razones de emisión, de propagación y de aglomeración, ha sido necesario transformar las frecuencias que se transmitirán en frecuencias más altas. Esto se hace por medio de la modulación.

En la técnica de la modulación, la señal eléctrica $e(t)$, que representa la información que se va a transmitir, hace variar un parámetro característico de una onda de alta frecuencia, llamada onda portadora. Los parámetros que $e(t)$ puede variar (modular) son la amplitud, la frecuencia o la fase de la onda portadora. El mensaje se transforma primero en una señal eléctrica analógica $e(t)$.

COMUNICACIONES DIGITALES

En las telecomunicaciones se puede observar que: cuanto más alta sea la frecuencia f de la portadora, mayor será el ancho de banda que se puede utilizar, lo que implica que, el número de canales a través de los cuales se pueda transmitir la información sea mayor. Asimismo, mientras más alta sea la frecuencia portadora f , podrá ser mayor la frecuencia f de la señal que contiene la información.

2.6.2 Transmisión por medio de señales discretas

A cada instante t , la información está contenida en la amplitud de una señal $e(t)$ continua en el tiempo. Se puede mostrar que, en ciertas condiciones, no provoca ninguna pérdida de información el hecho de conocer el valor instantáneo de la amplitud de la señal $e(t)$ sólo para algunos instantes sucesivos determinados, en lugar de conocerla para todos los instantes.

Los valores de la muestra pueden transmitirse por medio de señales discretas (pulsos). En la transmisión de pulsos, algún parámetro característico del pulso (amplitud, ancho o posición) se hace proporcional al valor de la muestra. Estos son los pulsos que después se transmiten.

En la transmisión digital, el valor de la muestra se convierte a forma binaria. Esta sucesión de "0" y de "1" se transforma en pulsos que se transmiten por la línea de transmisión.

2.6.3 Muestreo

Teorema del muestreo. La señal continua $e(t)$ puede descomponerse en una suma de señales senoidales simples que tienen ciertas frecuencias, las cuales están contenidas globalmente en una banda de 0 a B ciclos por segundo. B es la frecuencia más alta en el espectro de la señal $e(t)$, la condición fundamental es que la muestra (medida de valores instantáneos) se tomen en instantes separados a lo más $1/2B$ segundos. Por lo menos es necesario entonces una frecuencia de muestreo igual a $2B$. Si se conoce la frecuencia de muestreo y los valores de las muestras, puede reconstruirse la señal $e(t)$.

2.6.4 Transmisión por pulsos

Un tren de pulsos puede utilizarse para transportar la información muestreada. Lo que caracteriza a este tren de pulsos es su frecuencia, la amplitud y la duración de un pulso; la frecuencia del tren de pulsos es la frecuencia de muestreo y el valor de cada muestra se transmite por medio de un pulso al cual se le modula un parámetro característico.

Modulación de amplitud de pulsos (PAM). A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya amplitud es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen un ancho o duración W y un período $1/2B$ constantes. Es necesario que $W < 1/2B$ (véase la figura 2.11).

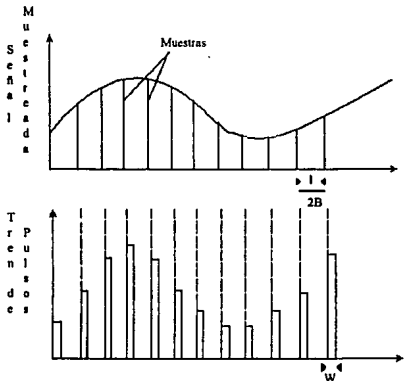


Figura 2.11 Modulación por amplitud de pulsos (PAM)

Toda la información (magnitudes de las muestras y frecuencia de muestreo) se encuentran en la amplitud y en la frecuencia de los pulsos.

Modulación por duración de pulsos (PDM). A cada muestra se le hace corresponder un pulso cuya duración W es proporcional a la magnitud de la muestra. Los pulsos tienen amplitud constante y frentes de subida separados $1/2B$. Es necesario que $W < 1/2B$ (véase la Figura 2.12).

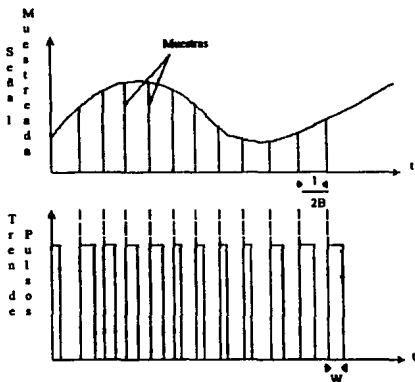


Figura 2.12 Modulación por duración de pulsos (PDM)

Toda la información se encuentra en la frecuencia de los pulsos (es decir el tiempo que separa dos frentes de subida) y en su amplitud.

Modulación por posición de pulsos (PPM). A cada muestra se le hace corresponder un pulso desplazado un tiempo Δt con respecto al instante de muestreo t (Δt es proporcional a la magnitud de la muestra). Los pulsos tienen amplitud y ancho W constantes. Es necesario que el Δt más grande sea inferior a $1/2B-W$. (Véase Figura 2.13).

La información está contenida en Δt , de modo que es necesario transmitir al mismo tiempo una señal de sincronización que permita determinar Δt y la frecuencia de muestreo. Esta señal suplementaria no es necesaria en la modulación de amplitud o duración.

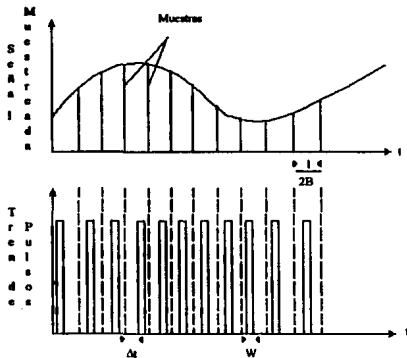


Figura 2.13 Modulación por posición de pulsos (PPM)

En los sistemas de transmisión con modulación de pulsos, las bandas de paso B' requeridas son:

$$\text{PAM} \quad B' = 1/W$$

$$\text{PDM} \quad 1/W < B' < 5/W$$

$$\text{PPM} \quad B' = 5/W$$

W es la duración del pulso (anchura)

Demodulación. El tren de pulsos modulado, después de ser amplificado o regenerado, debe demodularse para recuperar la señal $e(t)$, en el otro extremo del sistema de transmisión. El filtrado del tren de pulsos en modulación de amplitud, con ayuda de un filtro ideal de paso bajo con frecuencia de corte igual a B , es suficiente para recuperar $e(t)$. En modulación de duración de pulsos es necesario hacer una conversión de PDM a PAM. Esta conversión se realiza por integración y muestreo sincronizado. La señal de sincronización se recupera con la ayuda de los frentes de subida de la señal modulada en duración.

En modulación, es necesario realizar una conversión de PPM a PDM seguida de otra conversión de PPM a PAM.

2.7 DETECCIÓN Y CORRECCION DE ERRORES

En todo sistema de comunicación es inevitable la probabilidad de que ocurran errores durante la transmisión de la señal, por lo que se ha visto la necesidad de desarrollar e implantar procedimientos para el control de error. El control de error se divide en dos categorías generales: detección de error y corrección de error.

2.7.1 Detección de error

La detección de error es el simple proceso de monitorear la información recibida y determinar cuando ocurre un error en la transmisión. Las técnicas de detección de error no identifican en cual bit o bits está el error, solamente detectan que el error ha ocurrido.

Las técnicas más comunes de detección de error utilizadas en comunicación de datos son: redundancia, código de cuenta exacta (exact-count encoding), paridad, chequeo de redundancia vertical y horizontal (vertical and longitudinal redundancy checking) y chequeo de ciclo redundante (cyclic redundancy checking).

Redundancia. (Redundancy) Implica transmitir cada carácter o secuencia de caracteres (mensaje) dos veces. Si un mismo carácter o mensaje no es recibido dos veces sucesivamente, entonces ha ocurrido un error de transmisión.

Código de cuenta exacta (Exact-count encoding). Con el código de cuenta exacta el número de "unos" en cada carácter es el mismo; de esta forma basta con contar el número de "1" recibidos en cada carácter, para poder determinar si ocurrió error de transmisión.

Paridad (Parity). Probablemente este sea el método más simple de detectar error utilizado en los sistemas de comunicación de datos y en el chequeo de redundancia vertical y horizontal. En la paridad un bit, llamado bit de paridad, es agregado a cada carácter forzando a que el total de unos de dicho carácter, incluyendo el bit de paridad, sea o un número impar (paridad non) o un número par (paridad par). La definición de paridad es equivalente a igualdad.

La ventaja principal de la paridad es la simplicidad. La desventaja es que cuando en un número par de bits se recibe un error, al checar la paridad esta no detecta el error, puesto que si la condición lógica de dos bits está cambiada, ante la paridad refleja lo mismo. En consecuencia, en un largo periodo de tiempo, solamente se podrá detectar el 50% de los errores de transmisión.

Código de redundancia vertical y horizontal (Vertical and horizontal redundancy checking). El chequeo de redundancia vertical (VRC) utilizando la paridad determina dentro de que carácter está ocurriendo el error de transmisión. Por esto, algunas veces el VRC es llamado carácter de paridad. Con VRC, a cada carácter se le agrega un bit de paridad antes de la transmisión. Se puede utilizar paridad par o non.

El chequeo de redundancia horizontal o longitudinal (HRC o LRC) utilizando la paridad determina en que mensaje ocurre el error de transmisión, siendo por esto llamado también mensaje de paridad. Con el LRC, cada bit de posición tiene un bit de paridad. Con LRC, solamente es utilizada la paridad par. El LRC no funciona como un carácter (no es un carácter alfanumérico, gráfico o dato de control), es simplemente un secuencia de bits utilizado para detectar error.

Código de ciclo redundante (Cyclic redundancy checking). Probablemente el CRC sea el esquema más confiable por la detección de error. Con el CRC aproximadamente el 99.93% de todos los errores transmitidos es detectado. El CRC es utilizado generalmente con códigos de 8 bits o 7 bits cuando no se utiliza la paridad.

El carácter CRC es el residuo de un proceso de división. El polinomio de un mensaje de datos $G(x)$ es dividido por una función polinomio generador $P(x)$, se descarta el cociente y, el residuo se trunca con 16 bits y se agrega al mensaje como CRC. Al recibir los datos junto con el CRC son divididos por la misma función generada $P(x)$. Si no existió error en la transmisión, el residuo será igual a cero.

2.7.2 Corrección de error

Existen esencialmente tres métodos para la corrección de error: sustitución de símbolos, retransmisión y corrección de error transmitido.

Sustitución de símbolos (Symbol substitution). Fue diseñado para ser utilizado en un ambiente humano: la persona que se encuentra en la terminal de recepción, recibe y analiza los datos y toma la decisión sobre la integración de la información con la sustitución de símbolos; es decir, si un carácter se recibe con error, con alguna marca (ej.: ?) se sustituye dicho carácter, se analiza y si la información no es comprensible se solicita la retransmisión de la información.

Retransmisión. Como su nombre lo implica, cuando un mensaje es recibido con error automáticamente la terminal de recepción llama para que sea retransmitido el mensaje. La retransmisión es llamada frecuentemente ARQ (automatic request for retransmission) solicitud automática de retransmisión. Se pueden utilizar satisfactoriamente bloques de mensajes entre los 256 y los 512 caracteres como medida óptima cuando se utiliza ARQ para corrección de errores.

Corrección de error transmitido. (Forward error correction) FEC es el único esquema de corrección que actualmente detecta y corrige errores de transmisión al terminar de recibirlos sin llamar para retransmitir.

Con FEC los bits son agregados al mensaje antes de transmitirse. Los códigos de Hamming son de los más populares códigos para corrección de errores. El número de bits del código HAMMING depende del número de bits en el carácter de datos. El número de bits de Hamming que deben ser agregados al carácter es determinado por la siguiente expresión:

$$2^m > m + n + 1 \quad (2.4)$$

donde,

n = Número de bits de Hamming

m = Número de bits del carácter de datos

El código de Hamming solamente puede detectar bits de error simples (single-bit errors).

2.8 PROBABILIDAD DE ERROR Y TASA DE ERROR EN BITS

Un parámetro fundamental que determina la calidad de una transmisión digital es la tasa de errores de los bits (*BER* Bit error rate). La *BER* es igual a la probabilidad que ocurra un error $P(e)$ de decisión desde un punto de vista práctico. Es decir, si por ejemplo se tiene una $P(e) = 10^{-5}$, significa que se puede esperar un bit erróneo por cada 10^5 bits transmitidos. Por otro lado si un sistema tiene un $BER = 10^{-3}$ significa que en el pasado tuvo 1 bit por cada 10^3 bits transmitidos.

$P(e)$ = Probabilidad de error,

es un valor matemático teórico esperado de BER .

BER = Tasa de error en bits,

es un registro histórico del funcionamiento de un sistema de acuerdo al número de bits erróneos, se define como:

$$BER = \frac{N_e}{N_t} \quad (2.5)$$

donde:

N_e = Número de bits erróneos en un intervalo de tiempo t_0

N_t = Número de bits totales transmitidos en un intervalo de tiempo t_0

También puede definirse la ecuación como :

$$BER = \frac{N_e}{f_B \times t_0} \quad (2.6)$$

donde:

f_B = Velocidad de transmisión de bits/seg.

2.9 PROTOCOLOS

A medida que los enlaces de comunicación se amplían y la demanda de transmisión de datos es mayor, surge la necesidad de regular el tráfico de la información entre las diferentes terminales y puntos de enlace, así como el control a través de la supervisión de minicomputadoras o microprocesadores, requiriendo el desarrollo de una serie de detallados procedimientos de operación. Esta serie de reglas y procedimientos entre dos o más sistemas que establecen una comunicación, se denominan protocolos.

Un protocolo define la ruta de acceso a través de una secuencia de funciones que hace posible que un componente de un sistema de comunicación se comunique con otro componente, los cuales necesariamente se encuentran físicamente unidos. A continuación se mencionan algunas de las funciones de la ruta de acceso:

- La ruta de acceso genera la información de direccionamiento para que el mensaje transmitido pueda llegar a su destino correctamente.
- La ruta de acceso incluye un proceso de espera (buffer), que permite retener la información que llega hasta que la unidad de su destino este libre para procesarla y también mantiene en espera los mensajes de salida mientras las líneas de transmisión o enlaces físicos se encuentran ocupados. Para la ruta de acceso existe un sistema de control de error, facilitando la detección y la posible corrección de cualquier error en la transmisión.
- La función más importante de la ruta de acceso es la conversión de protocolos o administrador de diálogos, los cuales hacen posible que los formatos y signos de control del dispositivo de transmisión se puedan convertir a un formato y signos de control que entienda el dispositivo de recepción.

Por la diferencia existente entre un sistema y otro, los detalles de un protocolo variarán, dependiendo en cierta medida del microprocesador o microcomputadora utilizada, pero existen algunas características básicas que en general no cambian, y que se utilizan para resolver problemas operativos como:

- Encuadre. Determinación de qué grupos de bits constituyen caracteres y qué grupos de caracteres constituyen mensajes.
- Control de errores. Detección de errores, aceptación de mensajes correctos y peticiones de retransmisión de mensajes erróneos.

COMUNICACIONES DIGITALES

- **Control de secuencia.** Identificación de mensajes retransmitidos por el control de errores para evitar pérdida o duplicación de mensajes.
- **Control de línea.** Determinación, en el caso de una línea semidúplex o multipunto, de cuál estación va a transmitir y cuál o cuáles van a recibir.
- **Control de tiempo muerto.** Solución al problema de que hacer si súbitamente cesa por completo el flujo de mensajes.
- **Control de inicio.** Solución del problema de que procedimiento debe seguirse para iniciar la transmisión en un sistema de comunicación que ha estado ocioso.

3. MODULACION Y CODIFICACION PCM

La modulación y codificación por pulsos, PCM, por sus siglas en inglés (Pulse Code Modulation), es el proceso más extendido en cuanto a digitalización de la voz humana se refiere. Este sistema fue propuesto por Alec H. Reeves en el año de 1937, sin embargo, no fue sino hasta 1962 cuando la "American Telephone and Telegraph Company's" (AT&T), empresa norteamericana, introdujo los primeros sistemas PCM. Las especificaciones para procesamiento de señales de voz aplicados a redes telefónicas digitales están definidas en la recomendación G.711 del "Consultative Comitee for International Telephony and Telegraphy" (CCITT).

En la figura 3.1, se puede observar un diagrama de bloques que muestra los principales componentes de un sistema PCM-simplex.

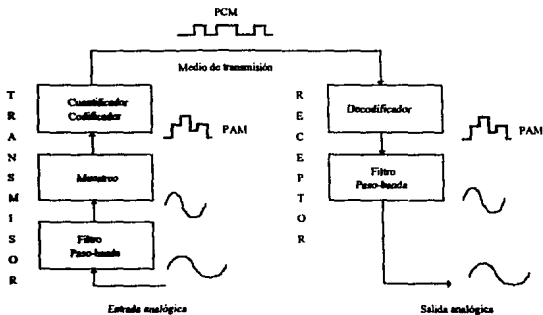


Figura 3.1 Diagrama de bloques de un sistema PCM simplex (transmisión en un solo sentido)

3.1 Filtros

Los circuitos filtros, denominados simplemente filtros, se utilizan para bloquear o dejar pasar un rango específico de frecuencias. Los filtros paso-bajas permiten el paso de frecuencias bajas, pero bloquean las frecuencias altas; los filtros paso-altas dejan pasar altas frecuencias, y bloquean las bajas; los filtros pasa-banda dejan pasar un intervalo específico de frecuencias, bloqueando tanto las frecuencias más bajas como las más altas; los filtros atrapa-banda, también conocidos como eliminadores de bandas, rechazadores de banda, filtros de supresión de bandas o trampas de onda; funcionan en forma inversa a los paso-banda, ya que bloquean un intervalo específico de frecuencias, dejando pasar las frecuencias más altas y más bajas.

Dependiendo de sus características, los filtros se diseñan con circuitos RL, RC y RLC en diferentes combinaciones.

Filtro paso-bajas

En la figura 3.2, se muestra un circuito RC, que se puede utilizar como filtro paso-bajas, así como la curva de respuesta en frecuencia.

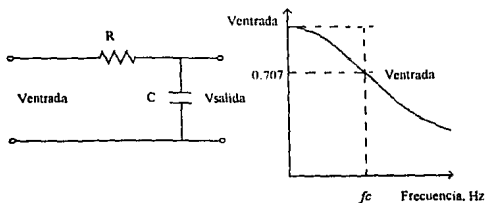


Figura 3.2 Circuito y respuesta en frecuencia de un filtro paso-bajas

El ancho de banda es:

$$\begin{aligned} BW &= f_2 - f_1 \\ BW &= f_c - 0 = f_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde:

f_c = frecuencia de corte

La frecuencia de corte es por encima de la cual el voltaje de salida cae por debajo del 70.7 % del voltaje de entrada.

La relación que existe entre R, C y f_c , se determina aplicando la ecuación del divisor de voltaje, y despejando el valor de f_c , que hace que el voltaje de salida sea igual a 0.707 del de entrada, como se observa en la siguiente ecuación.

$$V_{salida} = V_{entrada} \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (3.2)$$

Si se considera que a la frecuencia de corte;

$$V_{salida} = 0.707 V_{entrada} \quad (3.3)$$

Se substituye la ecuación 3.3 en la 3.2, expresando la ecuación resultante en función de la frecuencia de corte, para después despejar f_c ,

$$0.707 V_{entrada} = V_{entrada} \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

$$(0.707)^2 = \frac{X_c^2}{R^2 + X_c^2}$$

$$0.5R^2 + 0.5X_c^2 = X_c^2$$

$$R^2 = X_c^2$$

$$R = X_c$$

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

(3.4)

Por lo que en el diseño de un filtro paso-bajas, se escoge ya sea R o C , y se determina respectivamente el otro parámetro, en la ecuación 3.4.

Filtro paso-altas

En la figura 3.3 se muestra un circuito RC como filtro paso-altas, y el respectivo ancho de banda.

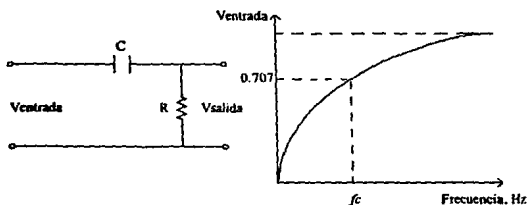


Figura 3.3 Circuito y respuesta en frecuencia de un filtro paso-altas

Por lo que siguiendo el procedimiento anterior, se tiene la ecuación 3.5:

$$V_{salida} = V_{entrada} \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (3.5)$$

$$0.707 V_{entrada} = V_{entrada} \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

$$(0.707)^2 = \frac{R^2}{R^2 + X_c^2}$$

$$X_c = R$$

$$\frac{1}{2\pi f_c C} = R$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

(3.6)

Filtro paso-banda

El filtro paso-banda se diseña mediante un circuito serie RLC. Ver la figura 3.4

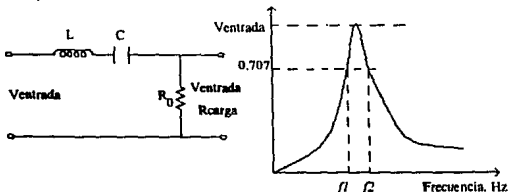


Figura 3.4 Circuito y respuesta en frecuencia de un filtro paso-banda

De lo anterior se obtiene:

$$R_T = \frac{R_0 R_{c_{\text{equiv}}}}{R_0 + R_{c_{\text{equiv}}}} \quad (3.7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$BW = \frac{f_r}{Q_s}$$

$$Q_s = \frac{\omega_r L}{R_T}$$

$$V_{\text{salida}} = V_{\text{entrada}} \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

$$V_{\text{salida}} = V_{\text{entrada}} \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + [2\pi fL - 1/(2\pi fC)]^2}} \quad (3.8)$$

Filtro atrapa-banda

El filtro atrapa-banda utiliza un circuito RLC serie cuyo ancho de banda y frecuencia de resonancia determinan el intervalo de frecuencias eliminadas. La figura 3.5 muestra tanto el circuito como la curva típica de respuesta en frecuencia.

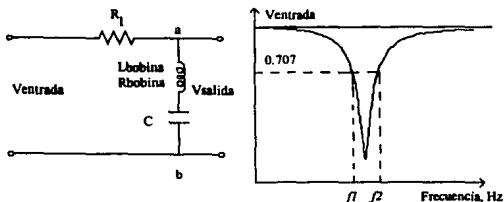


Figura 3.5 Circuito y respuesta en frecuencia de un filtro atrapa-banda

Por lo que:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

$$Q_s = \frac{f_r}{BW} = \frac{\omega_r L_{bobina}}{R_1 + R_{bobinas}}$$

Si la corriente demandada por la carga es insignificante,

$$V_{salida} = V_{entrada} \frac{Z_{ab}}{Z_{circuito}}$$

$$Z_{ab} = R_{bobinas} + j(X_L - X_C)$$

$$Z_{circuito} = R_1 + R_{bobinas} + j(X_L - X_C)$$

$$Z_{ab} = \sqrt{R_{bobinas}^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z_{circuito} = \sqrt{(R_{bobinas} + R_1)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$V_{salida} = I'_{entrada} \frac{\sqrt{R_{bobinas}^2 + (X_L - X_C)^2}}{\sqrt{(R_{bobinas} + R_1)^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (3.10)$$

MODULACION Y CODIFICACION PCM

3.2 Modulación por Pulsos Codificados (PCM)

PCM es una forma de modulación digital utilizada para transmitir la versión codificada de una señal analógica; para efectuar el proceso de conversión, se requiere básicamente de tres técnicas sucesivas, que son: muestreo, cuantificación, y codificación.

a) **Muestreo.** Dado que para reconstruir una señal analógica, basta con tomar una cadena de segmentos de la señal original, eliminando así la necesidad de hacerlo con la señal original completa, la técnica de muestreo se utiliza porque, se intenta transmitir a través de un canal digital, y por lo tanto, convertir la señal a pulsos que correspondan exactamente en amplitud a los de la señal original en los instantes respectivos, con una señal de pulsos de amplitud modulada (denominada PAM). En adición se debe considerar que se requiere de un cierto tiempo, tanto para tomar cada muestra, como para convertirla, por lo que no se podrá tomar la siguiente muestra hasta que la anterior haya sido procesada. Ver la figura 3.6.

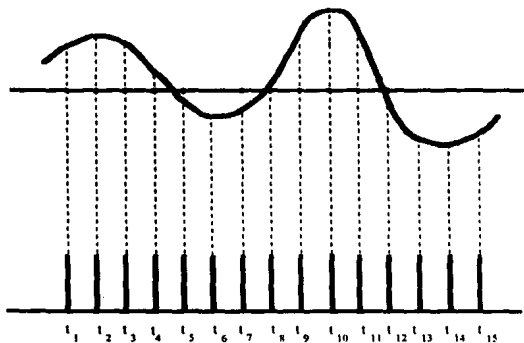


Figura 3.6 Muestreo discreto de una señal analógica

Sin embargo, para poder lograr lo anterior, se debe cumplir con el teorema de Nyquist; el cual establece que la mínima frecuencia de muestreo para garantizar la adecuada reproducción de la señal, debe ser mayor o igual que el doble de la frecuencia de la señal más alta que se va a transmitir, de lo contrario se origina el "traslape de espectros". El primer paso para evitar el traslape de espectros, es mediante la utilización de un filtro paso-bajas para limitar el espectro de frecuencias de la señal de entrada, adaptándolo a la frecuencia de muestreo. Frecuentemente en lugar de un filtro paso-bajas, se utiliza un filtro paso-banda, con objeto de eliminar interferencias de 50 ó 60 Hz que pudiera originar la red de energía. Delimitando la señal analógica de entrada a la de un canal de voz convencional, el cual tiene un rango de frecuencias de 300 a 4,000 Hz, aproximadamente.

Dado que el filtrado anterior garantiza un ancho de banda definido, se puede obtener un muestreo con la aproximación deseada. Por lo tanto, para el caso de un canal telefónico tradicional (de 4 kHz) la mínima velocidad de muestras discretas para evitar que la señal se distorsione, debe ser de 8,000 muestras por segundo.

Otro elemento que se requiere para el muestreo de la señal analógica, para obtener una señal PAM de multiniveles, es un circuito de muestreo y retención, cuyo propósito es el de tomar muestras periódicas de la señal analógica de entrada, según los diferentes valores en amplitud que pueda ésta tomar, convirtiendo las muestras a una serie de niveles PAM de amplitud constante, lo que posteriormente permitirá su codificación PCM.

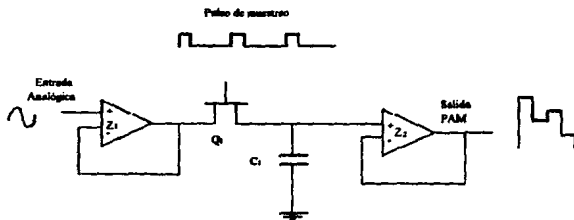


Figura 3.7 Circuito de muestreo y retención

MODULACION Y CODIFICACION PCM

Durante el funcionamiento del circuito de muestreo y retención cuyo diagrama de bloques, se puede observar en la figura 3.7, el transistor FET (Q1), actúa como un simple interruptor, que cuando está encendido permite el paso del voltaje de la muestra, permitiendo que éste se deposite en el capacitor (C1) y quede almacenado. Al tiempo que el interruptor está encendido, se le denomina "tiempo de adquisición" o "de apertura". Al tiempo de almacenamiento del capacitor, se le llama "tiempo de conversión A/D". Porque es durante el cual se efectúa la conversión de la muestra de voltaje, a un código digital. Al cambio de amplitud durante la conversión A/D, se le identifica como distorsión de apertura, la cual se evita, disminuyendo el tiempo de adquisición.

b) **Cuantificación.** La cuantificación se efectúa en un circuito de conversión de la señal analógica a digital (A/D), se utiliza para delimitar la cantidad de valores aleatorios, que pueda tomar la señal PAM, a un número predeterminado de magnitudes absolutas, como se puede observar en la figura 3.8.

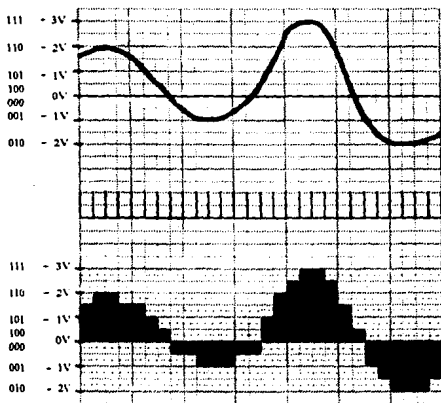


Figura 3.8 Diagrama de muestreo y cuantificación

Así, cada muestra se aproxima al valor más cercano dentro de estos niveles, por esto, el punto medio entre los límites de un intervalo es llamado nivel de decisión.

Por lo anterior puede existir cierto error de amplitud entre la muestra original, y el nivel de decisión. A esta diferencia de valores se le denomina "error de cuantificación".

Cuantificación no-lineal

Hasta ahora se ha asumido la utilización de un código PCM lineal donde se considera un nivel de cuantificación uniforme, en el que los cambios de magnitud entre pasos sucesivos es uniforme. Dando una resolución similar, tanto para las señales de mayor, como para las de menor amplitud, sin embargo el error de cuantificación no es lineal, siendo éste mayor para las señales de amplitud pequeña y despreciable para las de más grande, por lo que es necesario aplicar intervalos de cuantificación diferentes, haciéndolos más cortos para las señales de amplitud más baja y viceversa. De este modo se disminuye el error de cuantificación, incrementando la tolerancia al ruido, especialmente en los niveles más bajos.

c) **Codificación.** Es en este paso del proceso de conversión, donde a la señal PAM, con multiniveles en amplitud, se le asignan códigos de acuerdo a sus valores en magnitud, generando un código PCM binario que contiene la información necesaria para poder transmitir la señal y permitir su recuperación en el receptor. La codificación que se utiliza en PCM, se denomina código de "n" bits, donde "n" puede ser cualquier valor positivo mayor que uno. Los códigos actualmente utilizados se denominan "códigos de magnitud con signo", donde el bit más significativo (MSB), indica el signo, ya sea positivo o negativo, y los restantes la magnitud

Como ejemplo a lo anterior, si se tiene un código de tres bits, hay un MSB que indica el signo, y dos bits de magnitud. Por lo tanto existirán cuatro códigos para números positivos y cuatro para los negativos, o sea, ocho códigos posibles ($2^3 = 8$). Ver la figura 3.9.

MODULACION Y CODIFICACION PCM

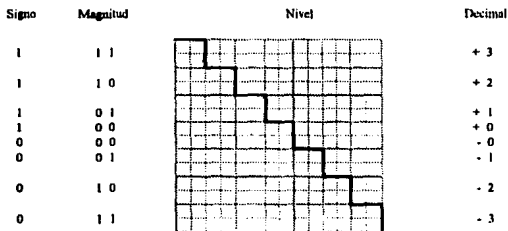


Figura 3.9 Código PCM de tres bits

Código binario simétrico

En adición a que en la figura 3.9, se puede observar que excepto por el bit que nos indica el signo, los códigos de la mitad superior se repiten en la mitad inferior, también se aprecia que existen dos códigos asignados a cero volts; "100" para el cero positivo (+), y "000" para el cero negativo (-). La magnitud de cambio mínima (1 V), se denomina "resolución", y es igual en magnitud al voltaje del bit menos significativo (LSB). En otras palabras, la resolución es el mínimo voltaje (excepto en cero), que puede ser codificado.

MODULACION Y CODIFICACION PCM

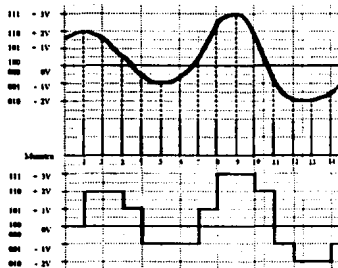


Figura 3.10 Señal analógica, pulso de muestreo, señal PAM y código PCM

En la figura 3.10 se observa una señal analógica, los pulsos de muestreo, la correspondiente señal PAM, y el código PCM. Si la señal analógica se muestrea cuatro veces se tiene que para cada tiempo t , corresponde un voltaje y un código PCM diferente, como se muestra en la tabla I.

Tabla I

Muestra	Tiempo	Voltaje	Código PCM
1	t_1	+2 V	110
2	t_2	+2 V	110
3	t_3	+1 V	101
4	t_4	-1 V	001
5	t_5	-1 V	001
6	t_6	-1 V	001
7	t_7	+1 V	101
8	t_8	+3 V	111
9	t_9	+3 V	111
10	t_{10}	+2 V	110
11	t_{11}	-1 V	001
12	t_{12}	-2 V	010
13	t_{13}	-2 V	010
14	t_{14}	-1 V	001

MODULACION Y CODIFICACION PCM

En adición a lo anterior, existen otros conceptos que determinan la eficiencia de los sistemas PCM, como son;

- Rango dinámico
- Eficiencia de codificación
- Relación señal a ruido de cuantificación
- Ruido de un canal en reposo

Rango dinámico

El rango dinámico tiene principal relevancia, dado que en relación a la máxima amplitud de entrada y a la resolución utilizada, determina la cantidad de bits a transmitir por un canal dado. Se define como la relación entre la mayor y la menor magnitud de voltaje que puede ser codificada; se puede expresar como:

$$\text{Rango dinámico} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (3.11)$$

Donde el valor mínimo de voltaje que se puede tomar, es el valor de resolución;

$$\text{Rango dinámico} = \frac{V_{\max}}{\text{resolución}} \quad (3.12)$$

Como se puede observar de la ecuación anterior, a medida que se disminuye el valor de la resolución, el rango dinámico se hace más eficiente, comúnmente se expresa en decibeles:

$$\text{Rango dinámico (dB)} = 20 \log \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (3.13)$$

Para determinar el código PCM a utilizar con un rango dinámico dado, se aplica la ecuación:

$$RD = 2^n - 1 \quad (3.14)$$

donde:

RD = Valor absoluto del rango dinámico

n = Número de bits a utilizar en un código PCM

Para encontrar el valor de n, se deben utilizar logaritmos, de la siguiente forma;

$$\begin{aligned} \log 2^n &= \log (RD + 1) \\ n \log 2 &= \log (RD + 1) \\ n &= \frac{\log (RD + 1)}{\log 2} \end{aligned}$$

donde:

n = Número de bits a utilizar en el código PCM

(sin considerar el bit de signo)

- b) **Eficiencia de codificación.** La eficiencia de codificación, es el indicador de que tan eficiente es un código PCM, se define como la relación del menor número de bits requerido, entre el número de bits utilizado por un código PCM (incluyendo el bit del signo), para cumplir con un cierto rango dinámico, y éste se expresa en porcentaje (%), como lo muestra la ecuación:

$$\text{Eficiencia de codificación} = \frac{\text{mínimo número de bits}}{\text{número de bits utilizados}} \times 100 \quad (3.15)$$

- c) **Relación señal a ruido de cuantificación.** Es importante conocer la relación señal a ruido de cuantificación (SQR), para poder determinar donde existe una mayor tolerancia al ruido, para obtener esta relación, se debe dividir el voltaje de la amplitud seleccionada entre el ruido de cuantificación, ya que el ruido de cuantificación es la mitad del voltaje del bit menos significativo, se obtiene la expresión mostrada en la ecuación:

$$SQR = \frac{\text{voltaje}}{\text{ruido de cuantificación}} = \frac{V}{V_{ls}/2} \quad (3.16)$$

De la ecuación anterior, se observa que, a mayor amplitud mejora la relación señal a ruido de cuantificación. Generalmente el ruido de cuantificación originado por la digitalización de una muestra analógica se expresan como: la relación de la potencia promedio de señal a la potencia promedio de ruido. Para los códigos PCM lineales la relación señal a ruido de cuantificación en decibels se determina como lo indica la ecuación:

$$SQR(dB) = 10 \log \frac{v^2 / R}{(q^2 / 12) / R} \quad (3.17a)$$

donde:

- R = Resistencia
- v = Voltaje rms de señal
- q = Intervalo de cuantificación

$$\frac{v^2}{R} = \text{Voltaje de la señal rms}$$

$$\frac{q^2/12}{R} = \text{Potencia de ruido de cuantificación RMS promedio}$$

Si se consideran resistencias iguales, la relación señal a ruido quedaría como sigue:

$$\begin{aligned} \text{SQR (dB)} &= 10 \log \frac{v^2}{q^2/12} \\ \text{SQR (dB)} &= 10.8 + 20 \log \frac{v}{q} \end{aligned} \quad (3.17b)$$

- d) **Ruido de un canal en reposo.** En los sistemas PCM también se debe tomar en cuenta la existencia de ruido térmico, y diafonía. Ambos generados por los dispositivos eléctricos y electrónicos propios del sistema, tanto en la transmisión como en la recepción, los cuales se presentan en las señales con amplitud más baja, por lo que aunque no exista una señal analógica a transmitirse, el ruido siempre estará presente en el canal de transmisión. De no eliminarse, éste se podría interpretar como parte del mensaje original, generando información incorrecta.

Para contrarrestar el efecto anterior, se utiliza la técnica de cuantificación "Trampa de Medio Paso" (Midtread), la cual consiste en aumentar el primer valor de la escala de cuantificación, a una amplitud mayor que la máxima amplitud del ruido térmico, por lo que lo ideal es la utilización de un código binario simétrico, de este modo se manejan dos valores para el voltaje cero y virtualmente se elimina la posibilidad de codificar ruido térmico.

3.3 Códigos Utilizados en PCM

Si se considera que en la transmisión de la voz humana son más frecuentes las señales de amplitud más baja, se presenta una pobre relación señal a ruido de cuantificación, existiendo un consecuente incremento de porcentaje de error. Es aquí, donde se requiere mejorar la precisión, y por lo tanto, se debe utilizar una codificación no-lineal que incremente la resolución en forma inversa a la amplitud de la señal de entrada.

MODULACION Y CODIFICACION PCM

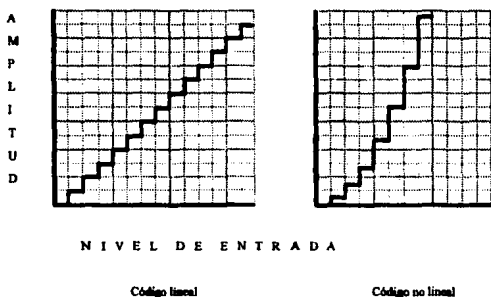


Figura 3.11 Comparación entre un código lineal y uno no-lineal

Se puede observar en la figura 3.11, que, con una codificación no-lineal, existen más códigos para la parte inferior de la escala que para la superior, lo que incrementa la precisión para las señales más pequeñas. Para lograr lo anterior, en la práctica se utiliza la técnica de compresión-expansión, con la cual, se comprime la señal antes de la transmisión y se expande en la recepción.

Compresión-expansión analógica

En el diagrama de bloques de la figura 3.12, se observa el proceso básico de la compresión-expansión analógica. En el transmisor, la señal analógica se comprime, muestrea y convierte a un código PCM lineal. En el receptor, el código PCM se convierte a una señal PAM, se filtra y entonces se expande a sus características de amplitud originales.

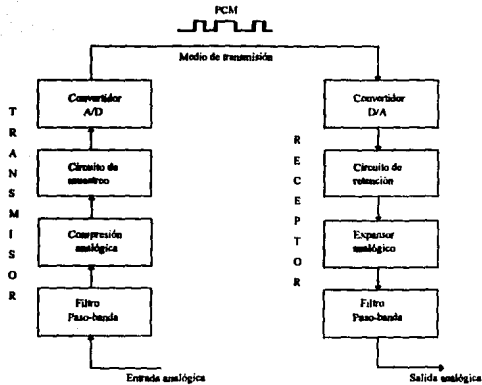


Figura 3.12 Diagrama de bloques de un sistema PCM con compresión-expansión analógica

Las señales de voz, requieren de una relación señal a ruido de cuantificación, lo más constante posible en un rango dinámico amplio; lo cual quiere decir que la distorsión debe ser proporcional a la amplitud de la señal para cualquier nivel de entrada. Esto requiere de un relación de compresión logarítmica.

Existen dos métodos de compresión-expansión analógica actualmente utilizados, que se aproximan a una función logarítmica y son conocidos como: ley- μ , y ley-A de codificación.

Ley- μ de codificación

El método de compresión-expansión ley- μ se utiliza en Estados Unidos de América y Japón, su característica de compresión está dada en la ecuación:

$$V_{sal} = \frac{V_{ent} \ln(1 + \mu V_{ent} / V_{ent})}{\ln(1 + \mu)} \quad (3.18)$$

donde:

V_{ent} = Máxima amplitud analógica de entrada sin compresión

V_{ENT} = Amplitud de la señal de entrada para un instante dado

μ = Parámetro de compresión deseado

V_{sal} = Amplitud de salida comprimida

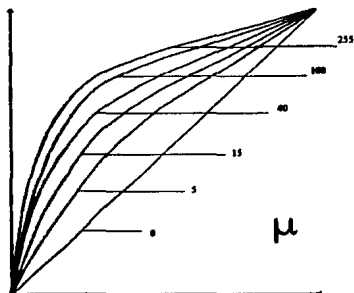


Figura 3.13 Características de compresión por ley- μ .

En la figura 3.13, se pueden observar varios niveles de compresión, para el valor $\mu=0$, se trata de una línea recta, por lo tanto, no existe compresión para este valor. El parámetro μ determina el rango de la potencia de la señal en el cual SQR es relativamente constante.

La transmisión de voz requiere de un rango dinámico mínimo de 40 dB y de un código PCM de 7 bits, por lo que se hace necesario un valor de $\mu=100$, o mayor. Actualmente se utilizan sistemas de códigos PCM de 8 bits, y un valor de $\mu=255$.

Ley-A de Codificación

La codificación por Ley-A, es la utilizada en Europa, y su característica de compresión está dada por la ecuación:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{sal}} &= V_{\text{máx}} \frac{AV_{\text{RNT}}/V_{\text{mín}}}{1 + \ln \frac{AV_{\text{RNT}}}{V_{\text{mín}}}} & 0 \leq \frac{V_{\text{RNT}}}{V_{\text{mín}}} \leq \frac{1}{A} \\
 V_{\text{sal}} &= V_{\text{máx}} \frac{1 + \ln(AV_{\text{RNT}}/V_{\text{mín}})}{1 + \ln A} & \frac{1}{A} \leq \frac{V_{\text{RNT}}}{V_{\text{mín}}} \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Compresión-expansión Digital

En la compresión-expansión digital, la señal analógica, a partir de que se toma el muestreo, se convierte a un código PCM lineal, para después comprimirse digitalmente. En la recepción, el código PCM comprimido se expande y luego decodifica. Ver figura 3.14.

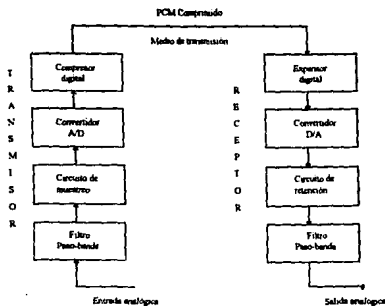


Figura 3.14 Diagrama de bloques de un sistema PCM con compresión-expansión digital

Los sistemas PCM de compresión digital más recientes, utilizan un código lineal de 12 bits y un código comprimido de 8 bits. Este proceso se acerca mucho a la curva de compresión analógica de $\mu=255$, con una serie de ocho segmentos rectos (del cero al siete), la pendiente de cada segmento sucesivo es exactamente la mitad del segmento previo. La figura 3.15 muestra la curva de compresión digital de 12 a 8 bits, para los valores positivos. Para los negativos, la curva es inversa y con las mismas características. No obstante que existen dieciseis segmentos (ocho positivos y ocho negativos), éste esquema se denomina "compresión de los trece segmentos". Esto es porque la curva para los segmentos "+0", "+1", "-0", y "-1" es en realidad una línea recta de pendiente constante, y por lo tanto se considera como un solo segmento. Para efectuar la de compresión-expansión de un código lineal de 12 bits, a uno comprimido de 8 bits, se requiere que el código comprimido de 8 bits, se componga de: un bit de signo, un identificador de segmento de 3 bits, y un código de magnitud de 4 bits, el cual identifica el intervalo de cuantificación, dentro de un segmento específico.

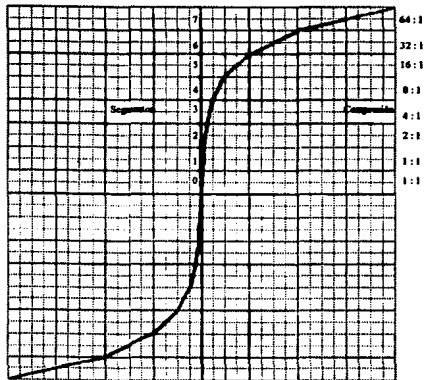


Figura 3.15 Características de compresión de $\mu 255$

Dado que con un código de 12 bits, el primero indica el signo, quedando once bits, con los que se pueden formar 2,048 códigos diferentes, como se muestra en la tabla II.

Tabla II

SEGMENTO	CODIGOS POSIBLES	CODIGOS RECUPERABLES	RELACION DE COMPRESION
0	16	16	1:1
1	16	16	1:1
2	32	16	2:1
3	64	16	4:1
4	128	16	8:1
5	256	16	16:1
6	512	16	32:1
7	1,024	16	64:1
TOTAL DE CODIGOS:	2,048	128	

El proceso de compresión es como sigue; a partir de que se le aplica el muestreo a la señal analógica, se convierte a un código lineal de magnitud con signo, de 12 bits. El bit del signo es transferido directamente al código de 8 bits. Contando el número de ceros existentes en la porción de magnitud del código de 11 bits, comenzando por el MSB, se cuenta el número de ceros, sin exceder de siete y se resta a esa cantidad 7, así se determina el número del segmento, el cual es sustituido por un código de 3 bits, convirtiéndose éste, en el identificador de segmento. Los bits que siguen a los bits en ceros, indican la magnitud del intervalo de cuantificación y son sustituidos en los LSB del código comprimido de 8 bits.

3.4 Modulación Delta PCM y Delta Adaptiva PCM

Las modulaciones delta y delta adaptiva, son utilizadas para simplificar el proceso de cuantificación de una señal analógica, dado que ambas emplean un código de un solo bit, las velocidades de transmisión en bits asociadas a estas modulaciones son mucho menores que las velocidades utilizadas en los sistemas convencionales de PCM.

3.4.1 Modulación Delta PCM

La modulación delta utiliza un código PCM de un solo bit, para efectuar la transmisión digital de señales analógicas. Con el PCM convencional cada código es una representación binaria tanto del signo como de la magnitud de una muestra específica. De esta manera se requiere de códigos con varios bits para reconstruir las muestras de la señal original. En el caso de la modulación delta, al utilizar un solo bit, éste representa si la muestra actual es más grande o más pequeña que la anterior, con unos y ceros lógicos respectivamente, el funcionamiento tanto del transmisor, como del receptor de modulación delta, es como sigue:

Transmisor de modulación delta

En el transmisor de modulación delta, la señal analógica de entrada se muestrea y convierte a una señal PAM, cuyo voltaje de salida es almacenado en forma binaria, para después compararse con la siguiente muestra y un contador se incrementa o decrementa de acuerdo a si la magnitud recibida fue mayor o menor que la anterior muestra. La figura 3.16 muestra esto.

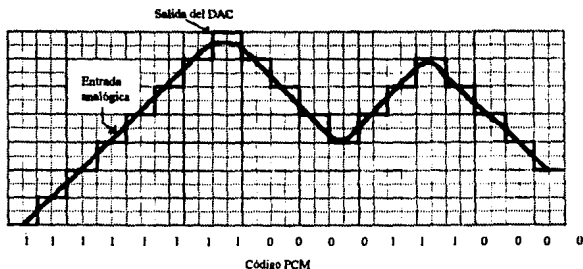


Figura 3.16 Operación ideal de un codificador de modulación delta

Receptor de modulación delta

La recepción de la modulación delta se efectúa de la misma manera que la transmisión, sólo que no se requiere hacer ninguna comparación para reconstruir la señal, ya que el contador se incrementa o decrementa de acuerdo a la señal recibida.

Puesto que con la modulación delta, cada muestra requiere la transmisión de solo un bit, esto disminuye notablemente la cantidad de bits involucrados, comparado con los sistemas PCM convencionales. Sin embargo existen dos problemas inherentes a la modulación delta, la sobrecarga por pendiente y el ruido granular.

La sobrecarga por pendiente ocurre cuando los cambios de la señal analógica son más rápidos que los que el convertidor analógico/digital (CAD) puede seguir. Sin embargo, lo anterior se puede evitar aumentando la velocidad de muestreo o bien incrementando los niveles de resolución. Ver la figura 3.17.

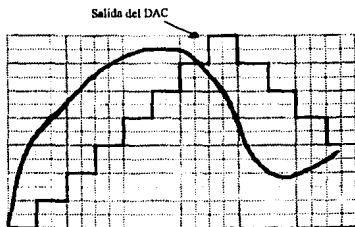


Figura 3.17 Distorsión de sobrecarga por pendiente

Se conoce que existe ruido granular cuando al reconstruir una señal de amplitud constante, ésta presenta valores inexistentes, siendo éste similar al ruido de cuantificación que se observa en un sistema PCM convencional. El ruido granular se puede reducir disminuyendo los niveles de resolución, ya que éste se presenta en señales analógicas que tienen cambios graduales y variaciones de amplitud pequeñas, ver la figura 3.18.

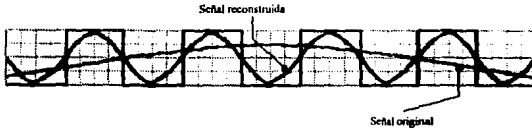


Figura 3.18 Distorsión por ruido granular

3.4.2 Modulación Delta Adaptiva PCM

La modulación delta adaptiva PCM es un sistema de modulación delta donde la resolución es variada automáticamente dependiendo de las características de amplitud de la señal analógica de entrada.

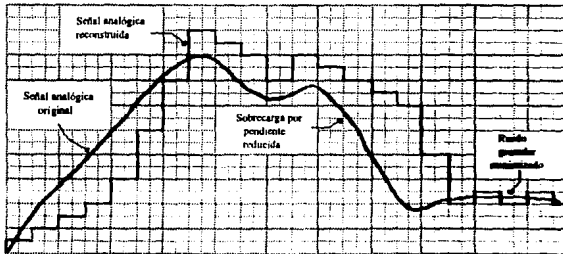


Figura 3.19 Modulación delta adaptiva

En la figura 3.19 se muestra como opera un modulador delta adaptiva. Cuando la salida del transmisor es una cadena de unos o ceros consecutivos, indica que el cambio en la salida del DAC es menor que el cambio de la señal analógica, ya sea en dirección positiva o negativa. Esencialmente, el DAC ha perdido el seguimiento de dónde, exactamente estaban las muestras y por consecuencia la posibilidad de que esté ocurriendo una sobrecarga por pendiente. Con un modulador delta adaptiva, después de un determinado número de unos o ceros consecutivos, el tamaño de la resolución automáticamente se incrementa. Después de la siguiente muestra, si la amplitud de salida del DAC está aún abajo de la amplitud de muestra, la resolución se incrementa.

Cuando ocurre una secuencia alternada de unos y ceros consecutivos, quiere decir que la probabilidad de que se este presentando ruido granular es alta. Consecuentemente, el DAC decrementa la resolución a su mínimo valor, reduciendo la magnitud del error por ruido granular. Un algoritmo común para un modulador delta adaptiva se aplica al ocurrir consecutivamente tres unos o ceros consecutivos, entonces la resolución se incrementa o decrementa por un factor de 1.5.

4. MULTIPLEXAJE DIGITAL

El multiplexaje digital, es una forma de compartir un mismo canal de transmisión por varios puntos de origen y de destino, a una velocidad tal, que pudiera parecer que el canal de transmisión esta simultánea y continuamente disponible a todos los usuarios, en adición a que permite compartir los mismos recursos de comunicación, tanto para voz como para datos. Al multiplexaje digital se le conoce como multiplexaje por división de tiempo (TDM) por sus siglas en inglés (Time Division Multiplexing). Existen en uso principalmente tres tipos de TDM, de acuerdo a las características de los datos transmitidos, que son, para transmisiones:

- a) Síncronas
- b) Cuasisíncronas
- c) Asíncronas

a) Multiplexaje de transmisiones síncronas. Este tipo de multiplexaje combina las entradas de transmisiones síncronas y las entrega a una velocidad de transmisión (igualmente síncrona) mucho más alta. Requieren estar gobernadas por un reloj de sincronía central.

b) Multiplexaje de transmisiones cuasisíncronas. El multiplexaje de transmisiones cuasisíncronas, o plesiocronas, donde existe una velocidad nominal de reloj para todas las entradas, sin embargo pueden darse pequeñas variaciones de sincronía, respecto a las frecuencias de reloj utilizadas. Este tipo de multiplexaje se utiliza en transmisiones de datos a velocidades muy altas, también se le conoce como multiplexaje con relleno de bits, por mantener las velocidades de entrada al nivel deseado.

c) Multiplexaje de transmisiones asíncronas. Estos multiplexores tienen entradas asíncronas de baja velocidad para multiplexar a una velocidad más alta, utilizados para manejar las entradas de datos de baja velocidad y transmitirlos por líneas de voz en sistemas telefónicos comerciales.

Existe otro tipo de multiplexores digitales inteligentes denominados concentradores. Son dispositivos que combinan el multiplexaje para transmisión de alta velocidad, así como la capacidad de ensamblar mensajes completos o bloques de mensajes antes de la transmisión, efectúan conversiones, de código, de rapidez, de formato, y mejoran la utilización de la línea,

MULTIPLEXAJE DIGITAL

promediando en forma estadística el tráfico de las salidas en una línea de alta velocidad. adicionalmente, pueden efectuar compresión de datos, y realizan detección y corrección de errores de manera automática.

4.1 Multiplexaje por División de Tiempo (TDM)

Con el multiplexaje por división de tiempo TDM, las transmisiones desde diferentes fuentes ocurren en el mismo lugar pero en diferente tiempo y éstas están intercaladas en el dominio del tiempo. Por lo que el tipo de modulación más comúnmente utilizada con TDM es el de PCM. Con los sistemas PCM-TDM, se efectúa el muestreo de varios canales a la vez, convirtiéndose a PCM, y por TDM, se envían por el canal de transmisión (ya sea, a través de un par de cables de cobre, microondas, satélite, fibra óptica). Permitiendo a cada canal, explotar todo el ancho de banda disponible para telefonía.

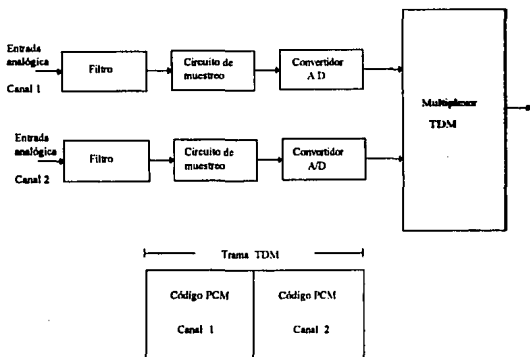


FIGURA 4.1 Sistema PCM-TDM de dos canales

La figura 4.1 muestra un diagrama de bloques simplificado, de un sistema de portadora PCM-TDM de dos canales. Cada canal es muestreado y convertido a un código PCM. Por lo que, sucesivamente, mientras un canal es transmitido, el otro es muestreado y codificado.

El multiplexor funciona básicamente como un interruptor electrónico, con un determinado número de entradas y una salida, a cada ciclo que emplea para el muestreo y transmisión un mismo canal, se denomina "tiempo de trama".

El código PCM para cada canal ocupa un espacio fijo de tiempo, dentro de la trama total del TDM. De acuerdo al total de canales a transmitir y el tiempo de trama determinado a cada canal se le asigna un período específico, el cual también está en función de la frecuencia de muestreo establecida. Una muestra para cada canal es tomada cada vez, y puesta en el grupo o trama que incluye las muestras de todos los canales.

Las tramas, se agrupan a su vez en multitramas y de acuerdo a la normalización establecida para cada canal, estas cumplen con un formato definido. Como ejemplo de tramas y multitramas, se utilizarán las existentes para un sistema PCM de 24 canales, y su correspondiente agrupamiento en multitrama, la cual está conformada por 12 tramas.

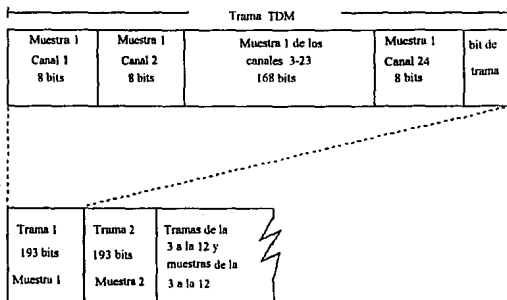


FIGURA 4.2 Formato de trama y multitrama de un sistema PCM de 24 canales

MULTIPLEXAJE DIGITAL

En la figura 4.2 se puede apreciar que a cada canal se le asigna un periodo determinado, con una longitud de palabra de ocho bits, por tratarse de un sistema que contiene 24 canales, la longitud de la trama debiera de ser 192 bits, sin embargo a dicha trama se le adiciona un bit para sincronización o alineamiento de trama, con lo cual el total de bits a transmitir es de 193 bits con una duración de 125 μ s. El patrón de este bit es de unos y ceros alternados, con lo que el receptor puede mantener la sincronía, y fácilmente detectarla nuevamente, en caso de perderla. Debido a que este patrón corresponde a una frecuencia de 4,000 Hz, al pasar a través de filtros es transparente para los usuarios.

La trama anterior conforma a su vez el agrupamiento de multitramas, las cuales tienen las siguientes características, para alineamiento, se substituye sólo el LSB, de cada seis tramas, con una resolución de 7 bits, por lo que la velocidad de muestreo es de 1, 333 bps. Dado que cada sexta trama incluye un bit de señalización, es necesario que todas las tramas estén numeradas, para que en la recepción se pueda extraer la información de señalización. Cada multitrama se compone de doce tramas, y por lo tanto, la señalización se incluye en las tramas 6 y 12, como esta está formada por dos bits, el MSB y el LSB, se colocan respectivamente en dichas tramas.

Las multitramas se subdividen de las tramas de la 1 a la 6, y de la 7 a las 12, denominándose respectivamente canales A y B, para identificar cada trama se utiliza una secuencia alternada de unos y ceros para las tramas nones, para las pares un patrón constante de 0 0 1 1 1 0 las tramas pares se utilizan para sincronización de muestra y trama, mientras que las nones se usan para identificar las tramas de señalización de los canales A y B, la trama número seis se identifica por la transición de cero a uno de la trama cuatro a la seis, y la trama número doce se identifica por la transición de cero a uno, entre las tramas 10 y 12.

Dado que la operación de las redes telefónicas requiere de señalización entre centrales telefónicas para efectuar la conmutación, a las tramas se les debe asignar un espacio destinado para este efecto, así como también espacios para la sincronización, la cual es requerida para no perder el orden de transmisión de las diferentes tramas. Para asegurar la sincronización de las tramas se han establecido cinco diferentes formas: adición de un dígito, sustracción de un dígito, adición de un canal, estadística y código de línea único.

Adición de un dígito

En la sincronización de trama con adición de un dígito, se conoce anticipadamente tanto la duración y longitud de las tramas, como el periodo de cada bit; a cada trama se le adiciona un bit, alternando entre cero y uno, con lo que el receptor busca en cada trama hasta encontrar esta secuencia alternada. Por lo que el tiempo máximo de sincronización está dado por la ecuación:

$$\text{Tiempo de sincronización} = 2NT = 2N^2t \quad (4.1)$$

donde:

T = Período de trama

N = Número de bits por trama

t = Tiempo de cada bit

Substracción de dígito

La sincronización de trama con substracción de dígito consiste en la sustitución periódica de bits de transmisión, con errores forzados con tal de mantener la sincronización de reloj, esta técnica se aplica en códigos con tramas pequeñas, como pueden ser los códigos B6ZS y B3ZS.

Adición de canal

Esta técnica de sincronización sigue la misma lógica que la de trama con adición de dígito, pero a diferencia de ésta, en lugar de agregar dígitos, utiliza el periodo equivalente al asignado a un canal completo en cada trama. El periodo promedio de sincronización, está dado por:

$$\text{Tiempo de sincronización (en bits)} = \frac{N^2}{2(2^L - 1)} \quad (4.2)$$

donde:

N = Número de bits por trama

L = Número de bits en el código de trama

Estadística

En la sincronización de trama estadística no es necesario agregar o quitar dígitos, ya que de acuerdo al código Gray, el segundo bit que se localiza en el centro o mitad del rango es uno, y cero en los extremos. Por lo tanto, una señal que tenga una distribución de señales con amplitud al centro del rango genera una alta probabilidad de "unos" en el segundo dígito. Las multitramas presentan tal distribución. La probabilidad de que el segundo dígito sea uno, es de 95 %, para cualquier otro bit se menor que 50 %, por lo tanto el segundo bit se puede usar como bit de sincronía.

Código de línea único

Este tipo de sincronización, consiste en un solo bit de sincronización, con un código diferente al utilizado para información, haciéndolo variar en amplitud, o en duración de tiempo. Esta técnica tiene la ventaja de adicionar bits, o hasta palabras, que contengan información, no limitando su uso sólo a sincronización, siendo ésta inmediata y automática.

Los dos sistemas utilizados en la transmisión telefónica digital en el primer multiplexaje bajo TDM, son los de 24 y 30 canales PCM, especialmente apropiados para interconexiones urbanas, dado que se explota la capacidad de las líneas convencionales; las características definidas para cada uno, son mostradas en la tabla III.

Tabla III

CARACTERÍSTICAS	PCM-30	PCM-24
Codificación	Ley-A	Ley- μ
Segmentos	13	15
Intervalos de canal	32	24
Número de canales	30	24
Longitud de trama	256 bits	193 bits
Intervalo para cada canal	3.9 μ s	5.2 μ s
Velocidad de transmisión	2 048 kbits/s	1 544 kbits/s

Consecuentemente, y dependiendo de los niveles en los que se transmite, se establece que los sistemas PCM, tienen una jerarquía, donde se definen las características de formato de trama, capacidad de canales de voz y velocidad numérica (número de bits por segundo), correspondientes en números de orden a través de líneas físicas que deben cumplir con ciertas condiciones de comunicación, a cada conjunto de condiciones, por nivel, se le conoce como sistema de portadora TDM.

4.2 Sistema de Portadora TDM

Los sistemas de portadora TDM para poder efectuar la transmisión de señales digitales codificadas por PCM, realizan las funciones de: filtrado de la señal analógica, muestreo y retención, y finalmente la conversión A/D de la señal. Cumplen en común con las siguientes condiciones para el primer nivel de transmisión:

- Frecuencia de muestreo de 8 kHz, o sea
- 8,000 muestras por señal telefónica
- Periodo de una trama de 125 μ s
- Longitud de palabra PCM de 8 bits
- Velocidad de cada canal de 64 kbits/s

A cada señal multiplexada se le denomina DS, y un número que indica a que tipo de portadora está asociada, enviándose éstas por canales físicos denominados, como líneas "T".

Este multiplexaje se efectúa en bancos de canales, de tipo "D", y es, en estos bancos o multiplexores, donde se puede conectar directamente equipo de cómputo.

El banco recientemente desarrollado es el D4, multiplexa 48 canales a una velocidad de 3.152 Mbps, y ocupa en la trama un espacio de 10 bits para sincronización.

La existencia de transformadores eléctricos en el trayecto de la información digital codificada impide su adecuada propagación, para evitar esto, se convierten los datos codificados, a un código de línea, el cual por ser bipolar, elimina la corriente continua de la señal. Dentro de estos códigos de línea, el más utilizado es el "High Bipolar Density-3" (HDB-3), por su alto nivel de polaridad que elimina la probabilidad de unos o ceros continuos.

MULTIPLEXAJE DIGITAL

Las señales digitales se deterioran a medida que estas son propagadas a través de la línea de transmisión, ocasionando errores de interpretación en la recepción. Es por esto que son requeridos los repetidores-regenerativos ubicados en intervalos periódicos de 800 a 2,000 m, que aseguren una apropiada relación señal a ruido; los que, con la información recibida reconstruyen los pulsos originales mediante la elevación del nivel de la señal. Cuando se reciben pulsos debilitados, a partir de un nivel de decisión, el pulso es nuevamente generado de acuerdo al lugar que ocupe en la escala asignada. Dado que la señal original no es amplificada, sino generada nuevamente, se asegura una relación señal a ruido, idéntica a la de la señal original.

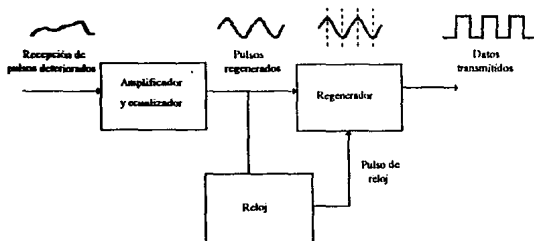


FIGURA 4.3 Diagrama de bloques de un repetidor regenerativo

La figura 4.3 muestra el diagrama de bloques de un repetidor regenerativo. Básicamente, éste consta de tres bloques funcionales, que son: un amplificador-ecualizador, un circuito temporizador, y un regenerador.

Sistema de Portadora T1 y T1C

Los sistemas de portadora T1 y T1C, permiten la transmisión de 24 canales de voz simultáneamente, a una velocidad de 1.544 Mbps utilizando codificación de línea BPRZ-AMI y repetidores regenerativos cada 2 Km, esta distancia, es la utilizada porque se aprovechan los pozos ya existentes, lo cual facilita las labores de inspección, mantenimiento y reparaciones requeridas. Otra ventaja que presentan los sistemas de portadora es la utilización de las líneas existentes de transmisión con base en cables de cobre.

Sistema de Portadora T2

El sistema de portadora T2 multiplexa a la vez, 96 canales de voz, en un señal de transmisión de 6.312 Mbps, hasta una distancia de 700 Km, utiliza un código de línea BPRZ-AMI, y se transmite a través de un cable especial conocido como LOCAP, el cual es de baja capacitancia.

Sistema de Portadora T3

El sistema de portadora T3 tiene una capacidad de transmisión de 672 canales de voz, sobre un cable metálico sencillo, su velocidad de transmisión es de 44.736 Mbps, y utiliza una codificación de línea de sustitución de tres ceros binarios (B3ZS ó HDB2), con lo que se elimina la posibilidad de transmitir tres ceros consecutivos.

Sistema de Portadora T4M

El sistema de portadora T4M, puede transmitir simultáneamente 4 032 canales de voz, sobre un cable coaxial sencillo, hasta una distancia de 700 Km, utiliza una señal digital unipolar NRZ., y transmite a una velocidad de 274.176 Mbps.

Sistema de Portadora T5

El sistema de portadora T5, transmite la señal multiplexada de 8,046 canales de voz y transmite a una velocidad de 560.16 Mbps, sobre un cable coaxial sencillo.

4.3 Jerarquías Digitales

El multiplexaje de señales permite la interconexión de instalaciones digitales con diferentes velocidades numéricas, para éste efecto se han establecido las jerarquías, donde de acuerdo a un número de orden, se establecen progresivamente en cada cambio de nivel en la jerarquía velocidades más altas de transmisión.

Jerarquías Digitales Norteamericana y Japonesa

Para pasar de un nivel de la jerarquía, al siguiente superior, se utilizan dispositivos llamados "Muldem's" (multiplexor/demultiplexor). Los muldem's pueden manejar conversiones de velocidades en ambas direcciones. Las designaciones utilizadas para éstos (M12, M13, etc.), identifican la entrada y salida de las señales digitales asociadas. Así, un muldem M12 es un multiplexor/demultiplexor que convierte en ambos sentidos, señales digitales DS-1 y DS-2. Un muldem M23, corresponde a las señales DS-2 y DS-3. Las señales DS-1, DS-2, DS-3, DS-4 y DS-5 pueden ser puestas sobre líneas T1, T2, T3, T4M, y T5, respectivamente. Las señales digitales son ruteadas en centrales llamadas "digital cross -connect" (DSX). Cada tipo de señal (DS-1, DS-2, etc.) tiene su propio tipo de central digital (DSX-1, DSX-2, etc.). Esto permite que se pueda crecer al siguiente nivel, codificándose en línea para ponerse en una respectiva línea física, denominada T (T1, T2, etc.), ver la figura 4.4.

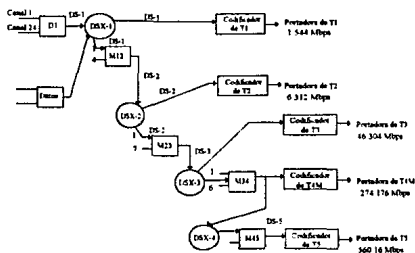


FIGURA 4.4 Diagrama de jerarquía digital de alta velocidad

La siguiente tabla, lista las señales digitales, velocidades, y capacidades de canal, incluidas en la jerarquía norteamericana. La cual se muestra en la tabla IV.

Tabla IV

Número de Orden	Número de Canales	Velocidad (Kbps)
1°	24	1,544
2°	296	6,312
3°	672	44,736
4°	4,032	274,176
5°	8,064	560,160

La jerarquía digital Japonesa, es una variante de la Norteamericana, y sus características, están dadas en la tabla V.

Tabla V

Número de Orden	Número de Canales	Velocidad (Kbps)
1°	24	1,544
2°	296	6,312
3°	5 T2	32,064
4°	3 T3	97,728

MULTIPLEXAJE DIGITAL

Jerarquía Digital Europea

La jerarquía Europea, definida por la CEPT, "European Post and Telecommunication Conference", está definida en la tabla VI. Siendo esta la jerarquía digital a la que México se apega.

Tabla VI

Número de Orden	Número de Canales	Velocidad (Kbps)
1°	30	2,048
2°	120	8,448
3°	480	34,368
4°	1,920	139,264
5°	7,680	565,148

4.4 Codificadores y Decodificadores (CODECS)

El Codec es un chip de integración de gran escala (LSI), diseñado para uso en la industria de la telecomunicación como es en bancos de canales, conmutadores. Por lo que es aplicable a cualquier propósito que requiera la digitalización de señales analógicas, como lo es un sistema de portadora PCM-TDM.

Codec, es el término que se utiliza para indicar que este chip, convierte las señales analógicas, a códigos digitales, y los códigos digitales a señales analógicas. Los Codecs más recientemente desarrollados se denominan chips COMBO, porque combinan las funciones de los Codecs y de los filtros en el mismo circuito integrado LSI. El filtro de entrada/salida provee las siguientes funciones; limita el ancho de banda, rechaza el ruido, evita la distorsión por traslape de espectros, y reconstruye las formas de onda de audio analógicas después de la decodificación. El Codec desarrolla las siguientes funciones; muestreo analógico, codificación/decodificación (conversiones A/D, D/A), y compresión-expansión digital.

5. FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

5.1 EVOLUCION DE LAS FIBRAS OPTICAS

El actual desarrollo y avance de las comunicaciones nos obliga a estar preparados para el futuro, con redes digitales para el intercambio de información entre grupos nacionales e internacionales; para esto, debemos contar con un medio de comunicación que no tienda a ser obsoleto. Comparar la carga de transmisión de información con el potencial de transmisión que ofrece la fibra óptica para el futuro a 20 años, nos plantea una comparación entre elementos que están fuera de proporción.

Aunque la transmisión de información por medio de ondas luminosas sobre fibras de vidrio o plástico es relativamente una nueva invención, la comunicación por medio de la luz a través de la atmósfera, es sin duda un proceso muy viejo.

En 1790, Claude Chappe construyó un sistema de telégrafo óptico, pero a mediados del siglo XIX, éste fue reemplazado por el telégrafo eléctrico de Morse.

En 1880, Alexander Graham Bell con la invención del teléfono, trajo consigo un paso más en la comunicación; en lugar de transmitir ondas de sonido sobre alambres, él usó un haz de luz.

En 1884, John Tyndall físico irlandés, mostró que la luz que se propaga en un medio con alto índice de refracción no puede penetrar en un medio que tiene un índice más bajo, cuando esta luz llega con un ángulo suficientemente más pequeño. Este principio, conocido con el nombre de reflexión total interna es la base del funcionamiento de la fibra óptica, ya que permite confinar la luz al medio de más alto índice.

A partir de la demostración de radio de Guillermo Marconi en 1895, se puede ver cómo fue utilizándose una proporción cada vez mayor del espectro electromagnético para transmitir información de un lugar a otro. La razón fue que en los sistemas eléctricos los datos usualmente se transfieren por el canal de comunicación superponiendo la señal de la información con una onda electromagnética senoidal conocida como portadora. En el destino, la información se separa de esta portadora y se procesa como resulte conveniente.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

Puesto que la cantidad de información que se puede transmitir está relacionada directamente con el rango de frecuencias sobre la que opera la onda portadora, al aumentar la frecuencia de la portadora teóricamente se incrementa el ancho disponible de la banda de transmisión y consecuentemente se tiene mayor capacidad de información. Por lo tanto la tendencia en los desarrollos de sistemas de comunicación eléctrica consistió en emplear frecuencias cada vez más altas (longitudes de ondas más cortas), que permitían correspondientes incrementos en ancho de banda y por tanto en capacidad de manejo de información. Así nacieron la televisión, el radar y los enlaces de microondas.

Otro segmento importante del espectro electromagnético es el que comprende la región óptica. Para esta región se acostumbra especificar la banda de interés en términos de longitud de onda en lugar de la frecuencia. El espectro óptico va de los 50 nm (ultravioleta) a los 100 μ m (infrarrojo), con el espectro visible comprendido en la banda de los 390 a los 770 nm.

Sin embargo no fue hasta 1927, que el inglés J.L. Baird y el americano C.W. Hansell, al registrar, sus patentes, dieron la posibilidad de transmitir imágenes empleando fibras de silicio.

En 1930, fue la primera vez que se usó una fibra de vidrio simple para la transmisión de imagen, por esto solo fue un experimento más realizado en laboratorio.

Más tarde, las fibras de plástico se utilizaron en el campo de la medicina para alumbrar lugares de difícil acceso; sin embargo, estas fibras eran poco eficaces.

A fines de la década de 1950, A.C.S. van Heel de Holanda, H.H. Hopkins y N.S. Kapany de Inglaterra desarrollaron una fibra con una cubierta protectora de menor índice y la utilización de haces de fibras, permitieron que esta tecnología evolucionara y llegara a aplicarse sobre todo en el campo de la medicina. La endoscopia fue el beneficio más grande que se obtuvo de estos progresos.

Con la aparición del láser (1960) se creó gran interés en establecer comunicaciones a frecuencias ópticas. Dado que las frecuencias ópticas son del orden de 10^{14} Hz (longitud de onda de 770 nm - 1700 nm), el láser ofrece una capacidad teórica de información que excede a la de los sistemas de microondas por un factor de 10 que aproximadamente es igual a 10 millones de canales de televisión.

Los experimentos que se realizaron utilizando canales ópticos o atmosféricos mostraron la posibilidad de modular una portadora óptica coherente a frecuencias muy altas. Sin embargo, los altos costos de instalación el tremendo costo para desarrollar todos los componentes necesarios y las limitaciones impuestas al canal atmosférico por la lluvia, la neblina, la nieve y el polvo hicieron que tales sistemas resultasen poco atractivos en función de las demandas de capacidad de los canales de comunicación.

En 1966, K.C. Kao y G.H. Hockman, consideraron seriamente la posibilidad de utilizar fibras como canales de transmisión en las telecomunicaciones (fibras revestidas). Sin embargo, éstas requerían progresos tecnológicos tanto a nivel de las fibras como de las fuentes de luz.

En 1968, K.C. Kao, propuso fibras ópticas de pérdidas bajas.

En 1970, Rapron, Keck y Maurer de la Fabrica de Vidrio Corning, anunciaron el desarrollo de fibras ópticas con pérdidas menores que 20 dB/Km, siendo este un desarrollo significativo, es así, como la fibra óptica fue desarrollada como tecnología de comunicación, como medio técnico para resolver los problemas asociados al cable telefónico tradicional o cable de par torcido, que consistía en limitaciones de velocidad de transmisión e incapacidad para manejar grandes volúmenes de información.

Posterior a esto, en los laboratorios de la "Standard Telephone" se desarrollaron fibras con atenuaciones de 10 dB/Km, empleando diodos emisores de luz (LED's) como fuentes de luz en una ventana de operación de 850 nm, siendo esta una luz no visible. Poco después se desarrollaron fibras ópticas con atenuaciones de 2 y 3 dB/Km lo que requería un repetidor o regenerador de señales cada 10 Km aproximadamente.

En las siguientes dos décadas los investigadores trabajaron intensamente para reducir la atenuación a 0.16 dB/Km para longitudes de onda de 1,550 nm.

Es así como, la Fibra Óptica es resultado de una tecnología basada en un filamento muy delgado (tan delgado como un cabello humano), de vidrio de alta pureza, que tiene la cualidad de transmitir luz en lugar de corriente eléctrica, teniendo así un medio muy efectivo para manejar grandes volúmenes de información a altas velocidades.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

5.1.1 El mercado de fibra

Después del crecimiento inicial en la comercialización de comunicaciones de larga distancia, el mercado de la fibra óptica ha cambiado dramáticamente.

El mercado está típicamente dividido en seis segmentos distintos, ver figura 5.1:

- Telecomunicaciones
- Redes
- Gobierno
- Televisión por cable (CATV)/video
- Utilerías (sensores)
- Manufacturación especializada (automóviles, computadoras, etc.)

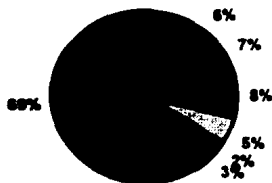


Figura 5.1 Tipos de Mercado

El crecimiento del mercado de la fibra óptica en Europa y Japón es realmente impresionante. El cableado por fibra representa una porción mayor de sistemas ópticos de fibra instalados.

Los principales fabricantes de fibra óptica son AT&T y Siecior, los cuales continúan dominando el mercado de la industria de fabricación de ésta, abarcando el 68% del mercado entre ellos. Siecior produjo el 35% de cable por fibra del total embarcado en 1990, mientras que AT&T embarcó el 33% del total.

Pero éstas no son las únicas que fabrican fibra óptica, sino que también se encuentran algunas compañías como: ALCATEL, Northern Telecom, Pirelli, etc. La producción de la fibra multimodo creció más rápido que la producción de la fibra monomodo en 1990. En la figura 5.2 se muestra los porcentajes que existen de un fabricante de fibra con respecto a otros considerando los más representativos.



Figura 5.2 Fabricantes de fibra óptica

5.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los sistemas de fibras ópticas tienen ventajas significativas sobre los sistemas de transmisión existentes, tales como:

1. Mayor ancho de banda, por lo tanto, hay mayor capacidad de transmisión.
2. Diámetro más pequeño, menor peso de los cables.
3. Carencia de llamadas cruzadas entre fibras paralelas.
4. Inmunidad a la interferencia inductiva.
5. Gran potencial de entregar señales a un costo más bajo.
6. Mayor distancia entre regeneradores.
7. Aislamiento eléctrico completo.

Pero estas no son solo las únicas ventajas que existen en un sistema de fibra óptica, también es necesario considerar las ventajas secundarias.

- Mayor seguridad
- Mayor tiempo de vida
- Mayor tolerancia a temperaturas extremas, tales como líquidos y gases corrosivos
- Mayor confiabilidad y facilidad de mantenimiento
- No existen señales de radiación externas
- Facilidad de expansión de capacidad del sistema
- Uso de recursos naturales comunes

5.2.1 Ventajas

A continuación se examinarán las ventajas principales y la relación que tiene con el mundo de las Telecomunicaciones.

1. **Mayor ancho de banda.** Esto significa tener un mayor volumen de información, mensajes o conversaciones que puedan ser transportados sobre un circuito particular.

Los sistemas de fibra óptica se han situado en el mercado con anchos de banda hasta 300 MHz. Con tal ancho de banda es posible transmitir miles de conversaciones o docenas de señales de video sobre el mismo circuito.

El empleo de los láseres y de los LED's abre una ventana del espectro electromagnético en frecuencias, diez mil veces superiores a las mayores empleadas en transmisiones de radio. Puesto que la capacidad potencial de información se incrementa de modo directamente proporcional a la frecuencia, el láser hace que sea posible transmitir 10^{14} bits.

- 2. Diámetro más pequeño y más ligero.** Son las ventajas más obvias de las fibras ópticas. A pesar de que las fibras están cubiertas de revestimientos y protectores, estos son mucho más pequeños y ligeros que los alambres de cobre. Por ejemplo una fibra óptica de 0.0127 cm de diámetro con revestimiento de 0.635 cm, pueden reemplazar a un cable de cobre de 7.62 cm de 900 pares, esta reducción permite que los cables de fibra puedan ser localizados en conductos subterráneos amontonados o en ductos.

La reducción de tamaño permite que los cables de fibra óptica, sean ideales para los sistemas de transmisión en barcos, aeronaves y edificios muy altos, donde los cables de cobre ocupan demasiado espacio, consigo a esto se reduce el peso enormemente: 94.54 Kg de alambre de cobre puede ser reemplazado por 3.63 Kg de fibra óptica.

La combinación de estas dos ventajas, generan un ahorro en el costo la transportación y almacenamiento de la fibra. La razón por lo que el cable de fibra óptica es tan delgado y de poco peso, es para que éste pueda ser manejado e instalado más fácil que el cable de cobre.

- 3. Carencia de llamadas cruzadas.** En circuitos de comunicación convencionales, las señales frecuentemente se pierden de un circuito a otro, provocando que las llamadas se crucen, estas no son considerables cuando se utiliza fibra óptica.
- 4. Inmunidad a la interferencia inductiva.** Tal como los materiales dieléctricos, las fibra ópticas no actúan como antenas y por lo tanto no se ven afectadas por radiofrecuencia (RFI), interferencia electromagnética (EMI) o pulsos electromagnéticos (EMP), que provocan ruido en la transmisión. Esto es, que las fibras ópticas son inmunes a la interferencia provocada por relámpagos, electromotores cercanos, relevadores y docenas de otros generadores de ruido eléctrico que inducen algunos problemas en los cables de cobre, a menos que estos sean filtrados.

La fibra óptica particularmente puede ser útil en ambientes nucleares ya que la inmunidad al EMP no le afecta. La configuración de los campos electromagnéticos que se propagan en las fibras es tal que, en la práctica, se produce un completo aislamiento con el exterior. Así pues, las fibras no contribuyen a interferir en otros sistemas y viceversa, son inmunes a las interferencias originadas por otros portadores.

- 5. Gran potencial de entregar señales a un costo muy bajo.** La arena, el ingrediente básico de las fibras ópticas de vidrio y plástico es más barato que el cobre.

En aplicaciones muy sencillas, es difícil para la fibra óptica competir económicamente con los sistemas instalados con alambre de cobre. Sin embargo, donde la capacidad de comunicación requiere cable coaxial en lugar de cable de cobre o donde se requiere un alambre especial, los enlaces de fibra óptica pueden ser competitivos con los precios actuales.

Los costos para los sistemas de fibra óptica deben ser mucho más atractivos y tener una base mejor para comparar la fibra con pares de cable de cobre o coaxiales. Tales costos incluyen: embarque, manejo e instalación para una buena manufacturación.

La baja pérdida en la línea, la disminución del número de repetidores son ventajas para las fibras ópticas, esto reduce el costo del sistema y por lo tanto el mantenimiento.

Así como el cable trenzado y el cable coaxial, la fibra óptica solamente es otro competidor en los sistemas de microondas. A pesar de que las microondas pueden transmitir confiadamente muchos datos (bits/s), los sistemas de fibras ópticas prometen ir más lejos y a un menor costo que instalar torres de microondas.

- 6. Mayor distancia entre regeneradores.** Como los sistemas de fibra óptica tiene la gran ventaja de entregar mayor información que los sistemas existentes en el mercado, tener regenerados a distancia muy cortas se ha reducido grandemente
- 7. Aislamiento eléctrico.** Las fibras proporcionan un total aislamiento eléctrico entre el transmisor y el receptor. Ello posibilita ciertas prestaciones: no se precisa una tierra común entre el transmisor y receptor: puede repararse la fibra aunque los equipos no estén apagados; los cables de fibra pueden atravesar zonas con fuertes inducciones sin peligro de descarga eléctrica ni riesgo de que se originen cortos circuitos.

Por sí mismas, estas ventajas son suficientes para justificar el uso de las fibras ópticas en un sin número de aplicaciones, sin embargo, las ventajas secundarias no deben pasarse por alto.

- **Mayor seguridad.** Puesto que las fibras ópticas no irradian energía electromagnética, la señal transmitida por ella no pueden ser captadas desde el exterior. Algunas aplicaciones militares se basan en esta propiedad.

Como la fibra propaga la luz, cuando esta es dañada no se genera ninguna chispa que provoque un corto circuito, por consiguiente, el cable de fibra óptica puede ir a través de áreas (tales como plantas químicas y minas de carbón) con gases altamente volátiles, sin temor a causar fuego o alguna explosión. En efecto, en tanto que el cables de fibra óptica no tiene un elemento de acero , esto proporciona un aislamiento eléctrico entre el transmisor y el receptor.

Si un cable se daña o se rompe, no existe cortos circuitos o reflexiones en los equipos terminales. Las fibras ópticas pueden repararse en el campo aún cuando el equipo este encendido.

- **Mayor tiempo de vida.** El tiempo de vida estimado para la fibra óptica es de 20 a 30 años en comparación con el cable convencional.
- **Mayor tolerancia a temperaturas extremas.** La razón por la cual, los cables de fibras ópticas están hechos de vidrio o plástico en lugar de metal, es debido a que la fibra tiene una alta tolerancia a temperaturas extremas, así como también a líquidos y gases corrosivos.

5.2.2 Desventajas

La principales desventajas que presentan los enlaces de fibra óptica son:

1. Costo
2. Capacidad
3. Manejo

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

1. **Costo.** El costo inicial al instalar este tipo de sistemas es **extremadamente elevado** en comparación con los demás sistemas de comunicación existentes en el mercado.
2. **Capacidad.** Otra desventaja que pueden presentar este tipo de sistemas es que **generalmente** son recomendables para sistemas que requiere una alta capacidad de transmisión en el manejo de voz, imagen y vídeo. **Para enlaces cortos y de baja capacidad no es recomendable.**
3. **Manejo de la fibra.** Como la fibra está elaborada de materiales sumamente **delicados**, debe tenerse un manejo muy especial en su instalación a diferencia de los otros **sistemas** de comunicación.

5.3 PRINCIPIOS DE OPERACION Y PARAMETROS CARACTERISTICOS

Las fibras ópticas pueden ser catalogadas dentro de una rama de la **óptica**; **permiten** la comunicación por medio de la luz a través de fibras de vidrio o plástico. Si **solo se toma en cuenta** las trayectorias seguidas por la luz, sin considerar la naturaleza física de las ondas electromagnéticas, entonces su estudio pertenece al campo de la **óptica geométrica**.

En base a los medios en que se puede propagar la luz a través de la **fibra óptica**, estas se dividen en dos tipos, las cuales se explicarán más adelante:

- Fibras monomodo
- Fibras multimodo

El mecanismo de la transmisión de la luz a lo largo de una fibra óptica se **basa en la reflexión** total interna que ocurre cuando un haz de luz emerge de un medio denso a uno **menos denso**.

En un sistema de fibra óptica existen tres aspectos principales que **desempeñan la tarea de** comunicación; una fuente de luz, una fibra óptica y un detector o receptor de luz. La **fuentes de luz** puede ser un diodo emisor de luz (LED) o un diodo láser (LD). La fibra óptica puede ser tan corta como 1 m o tan larga como 7 Km. El detector puede ser un fotodiodo de **avalancha (APD)** o un diodo negativo intrínseco positivo (PIN).

Básicamente en un sistema de fibra óptica, simplemente se convierte una señal eléctrica a una señal de luz infrarroja, transmitiendo esta señal en una fibra óptica y capturando esta en otra fibra donde se reconvierte en señal eléctrica.

Existen dos tipos de modulación para la luz: análoga y digital. En una modulación análoga la intensidad del haz de luz del láser o del LED varía continuamente, esto es, que la fuente de luz emite un haz continuo de intensidad variable.

En una modulación digital, la intensidad es cambiada impulsivamente, se enciende o se apaga. La modulación digital es la más usada ya que permite grandes distancias de transmisión con la misma potencia que en la modulación análoga.

5.3.1 Longitud de Onda

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

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.1)$$

Si su longitud de onda está comprendida entre 0.4 μ m y 0.8 μ m, las ondas electromagnéticas tienen la particularidad de excitar el ojo humano, y de ésta forma ser visibles.

5.3.2 Leyes de reflexión y refracción

La luz puede transmitirse, reflejarse o refractarse en la superficie de separación que existe entre dos medios diferentes (aire, vidrio, plástico), es decir, su dirección inicial sufre una desviación. Es por eso, que es necesario definir las leyes de reflexión y refracción.

Leyes de reflexión

Si la luz incide sobre una superficie plana, el ángulo de reflexión θ_r , es igual al ángulo de incidencia, como se observa en la figura 5.3. Los ángulos se midieron con respecto a la perpendicular a la superficie reflectora (AN), en el punto de incidencia A. Esta recta se llama la normal a la superficie en el punto A.

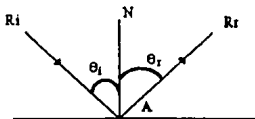


Figura 5.3 Reflexión de la luz

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

Leyes de la refracción

En un medio dieléctrico, la luz se propaga a una velocidad menor, en comparación con la que alcanza en el vacío. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el dieléctrico se llama índice de refracción del dieléctrico (n). Este índice de refracción n es una característica específica del medio. Por lo tanto es la medida más importante en óptica para cualquier material transparente. El índice de refracción se define entonces como la relación de la velocidad de la luz en el vacío a la velocidad de la luz en el medio. La velocidad de la luz en un material siempre es más baja que en el vacío, por lo tanto el índice de refracción siempre es mayor o igual a uno.

En la práctica el índice de refracción es medido para comparar la velocidad de la luz en el material. Se tiene entonces:

$$\frac{c}{v} = n \text{ donde } n > 1 \quad (5.2)$$

La luz se desvía (se refracta) cuando atraviesa la interfaz de dos diferentes medios dieléctricos cuyos índices son n_1 y n_2 , mostrado en la figura 5.4, de tal forma que:

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

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ o } n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (5.3)$$

La cual se conoce como la Ley de Snell.

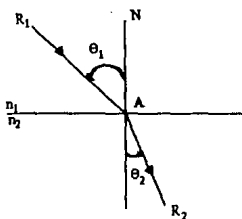


Figura 5.4 Refracción de la luz

Es importante considerar dos casos que se pueden presentar cuando se refracta la luz:

1. Caso: $n_1 < n_2$. La luz pasa a un medio que tiene un índice mayor, por ejemplo del aire al vidrio. Se tiene entonces:

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 \quad (5.4)$$

En este caso existe un valor máximo del ángulo de refracción θ_{2c} , valor que corresponde a $\text{sen } \theta_1 = 1$ ($\theta_1 = 90^\circ$).

$$\theta_{2c} = \arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (5.5)$$

θ_{2c} se conoce como el ángulo crítico de refracción.

2. Caso: $n_1 > n_2$. La luz pasa de un medio a otro que tiene un índice menor, por ejemplo del vidrio al aire.

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 \quad (5.6)$$

Como la función seno no puede ser mayor que uno y la relación n_1 / n_2 si lo es, entonces $\text{sen } \theta_1$ tiene como límite superior a $\text{sen } \theta_{1c}$:

$$\theta_{1c} = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (5.7)$$

Si $\theta_i > \theta_c$, la luz ya no se refracta, por lo contrario, se refleja totalmente en el medio original cuyo índice es $n_1 \cdot \theta_c$, se le conoce como ángulo crítico o ángulo mínimo de reflexión total interna.

Para que la luz permanezca en el material, ésta debe sufrir reflexiones cada vez que llegue a una interfaz entre el canal y el medio circundante, que suele estar constituido por aire. Supóngase que el canal de transmisión es una fibra de vidrio, para que la luz no pueda salir de la fibra, sólo basta recubrir la pared externa con una capa metálica. La luz experimenta reflexiones sucesivas sobre el espejo y luego se propaga en la fibra. En efecto, en el momento de la reflexión sobre una superficie metálica, no se refleja toda la luz. Una porción se pierde debido a la absorción en el metal, para un espejo de aluminio, esta pérdida de reflexión es del orden del 10%, por lo que, después de algunas decenas de reflexiones, prácticamente ya no hay luz. Pero esto se puede evitar mediante la reflexión total interna.

En la fibra de vidrio con índice de refracción de 1.5, cuando la luz alcanza la interfaz vidrio-aire con un ángulo mayor que 41.8° , se refleja totalmente hacia el interior de la fibra. De esta forma, la luz podrá propagarse a todo lo largo de la fibra, debido a la serie de reflexiones totales internas. Sin embargo, la reflexión total interna como su nombre lo indica no existen pérdidas; ésta no ocasiona ninguna atenuación por lo que la propagación por medio de reflexión total interna es la única que se toma en cuenta para transmisiones a larga distancia.

5.3.3 Apertura Numérica

Una fibra óptica es un cilindro de material dieléctrico transparente en el que el índice de refracción n_1 es superior al del medio circundante, como el fenómeno de reflexión total interna se produce en la interfaz entre la fibra y del medio exterior, esta superficie debe definirse bien, es decir, no debe tener defectos. La luz que se propaga en la fibra óptica cumple las condiciones de la reflexión total interna, es decir, llega a la interfaz con un ángulo mayor que el ángulo crítico. Si existe algún defecto en la interfaz tal vez esta condición no se cumple, por lo que la luz puede refractarse fuera de la fibra y en consecuencia perderse. Para evitar este inconveniente, se envuelve la fibra con otro dieléctrico, presentándose ahora como dos cilindros concéntricos.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

El cilindro interno, con índice n_1 , se le denomina núcleo de la fibra y al cilindro externo con índice n_2 se le denomina revestimiento.

Siempre es importante considerar que para que exista una reflexión total interna n_1 debe ser mayor que n_2 , como se observa en la figura 5.5.

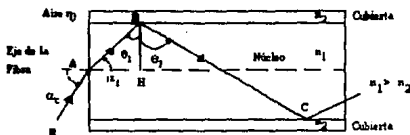


Figura 5.5 Corte Longitudinal de una fibra óptica

En el cual un rayo luminoso R, procedente de un medio con un índice n_0 penetra la fibra en A, este rayo se refracta en ese punto. En B, el rayo experimenta una reflexión total, lo mismo sucede en C y así sucesivamente. Por medio de una sucesión de reflexiones totales, la luz se propaga en zig-zag en la fibra.

En A, la ley de Snell señala:

$$n_0 \text{ sen } \alpha_0 = n_1 \text{ sen } \alpha_1 \quad (5.8)$$

y para tener una reflexión total en B, etc., se debe tener:

$$\text{sen } \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1} \quad (5.9)$$

Obteniendo de lo anterior lo siguiente:

$$\text{sen } \alpha_o \leq \frac{1}{n_o} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{sen } \alpha_{om} \quad (5.10)$$

en la cual se establece el valor máximo del ángulo de entrada para que la luz pueda reflejarse totalmente en B y de esta manera pueda propagarse.

Todo rayo luminoso que llegue a la cara de entrada de la fibra con un ángulo menor que α_{om} se propagará, esta luz está contenida en un cono de admisión o cono de aceptación, como se observa en la figura 5.6.



Figura 5.6 Cono de aceptación de la fibra

En general, el medio que rodea a la fibra está constituido por aire y, por ende, se puede tomar $n_o = 1.0$, entonces el ángulo máximo de entrada está dado por:

$$\text{sen } \alpha_{om} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5.11)$$

Este importante ángulo determina la capacidad de la fibra para propagar la luz. Por analogía con los instrumentos de óptica, se define un parámetro llamado "apertura numérica" geométrica de la fibra (AN), o bien, indica el ángulo de aceptación de la luz en la fibra, o simplemente la facilidad con que la fibra permite que la luz pase a través de ella.

En el caso en el que el medio externo sea el aire, la apertura numérica está dada por:

$$AN = \text{sen} \alpha_{\text{m}} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5.12)$$

La apertura numérica es un parámetro muy importante a considerar cuando se determinan pérdidas en la fibra, ya que es uno de los factores que contribuyen a incrementarlas.

Aperturas numéricas muy grandes se correlacionan con una alta eficiencia para su acoplamiento, permitiendo sólo pérdidas bajas en los empalmes, los conectores y en la potencia.

La apertura numérica de una fibra depende de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, pero no de sus dimensiones. Por otra parte, se podría aumentar AN si se escogieran los dos índices, y por consecuencia aumentar la cantidad de luz que puede entrar por la fibra, y por otra parte se podría disminuir bastante las dimensiones de la fibra, lo que tendría como ventaja hacerla más flexible. Las aperturas numéricas de las fibras comerciales varían entre 0.1 y 0.6.

Cuanto mayor sea la diferencia entre el índice del núcleo y el del revestimiento mayor será la AN , por lo que aumentará el número de ángulos de entrada que permitan la propagación de la luz.

5.3.4 Longitud de Onda de Corte

La mínima longitud de onda en la que una fibra óptica permitirá la propagación de solo un modo se conoce como la longitud de onda de corte. Es importante notar que el arreglo físico de la fibra juega un papel muy importante en la definición de la región de operación en la fibra monomodo. Las condiciones típicas de los cables en el campo tienden a correr la longitud de onda de corte a valores inferiores. Por lo tanto, la longitud de onda del cable de fibra es una representación más exacta de la longitud de onda de corte que puede ser esperada en el uso real y puede ser de más interés para el usuario.

5.3.5 Frecuencia Normalizada

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

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5.13)$$

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

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (AN) = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (5.14)$$

Para una fibra monomodo $V \leq 2.405$

donde:

Δ = diferencia de índices entre el núcleo y el revestimiento, cuando estas son pequeñas.

$$\Delta = n_1 - n_2$$

Así como también dependen del estudio de la teoría electromagnética basado en las funciones de Bessel.

5.3.6 Pérdida de Fresnel

Para entrar en la fibra, la luz debe pasar la interfaz entre el aire y el núcleo de la fibra como se ha visto. Como el aire tiene un índice de refracción n_0 diferente al del núcleo de la fibra n_1 , una parte del flujo energético se refleja y, en consecuencia, no se acopla. Esta pérdida de luz debida a la reflexión se denomina Pérdida de Fresnel. El factor de reflexión ρ , definido como la relación entre el flujo energético reflejado y el flujo energético incidente perpendicular a la superficie es igual a:

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (5.15)$$

y por consiguiente la pérdida debida a la reflexión (pérdida de Fresnel), se escribe:

$$D_R = 10 \log_{10}(1 - \rho) \quad (5.16)$$

Es importante observar que esta pérdida de Fresnel es más pequeña en comparación con las pérdidas que se originan en las pérdidas de apertura numérica.

5.3.7 Atenuación

En la evolución de las fibras ópticas, la atenuación siempre ha representado un factor principal a vencer para obtener una alta transmisión de la señal. Es así que, la atenuación puede definirse como las pérdidas que se producen entre la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, es decir, es la cantidad de señal perdida en la transmisión en comparación con la potencia de salida contra la de entrada, por lo tanto, la pérdida se define como:

$$\alpha = -10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5.17)$$

P_1 = Potencia de entrada a la fibra

P_2 = Potencia a la salida de la fibra

La atenuación de una fibra óptica se mide en decibelios (dB). Una onda electromagnética transporta energía, en el vacío, en ausencia de toda materia, esta energía se propaga sin ninguna modificación. Sin embargo, tan pronto como una onda electromagnética interactúa con la materia, la energía transportada por la onda se modifica. Esta modificación puede tomar dos aspectos.

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

La onda puede ser difundida de igual manera, en cuyo caso la energía se distribuye en todas direcciones. Estos dos fenómenos, contribuyen a la atenuación de la luz que se propaga en la fibra. Para las fibras ópticas la atenuación se produce principalmente por: la absorción y la dispersión.

La absorción se debe a las impurezas químicas que existen en el vidrio y la dispersión a las propiedades del material. La atenuación por absorción se debe a pérdidas por calor y que a su vez se dividen en: atenuación por absorción intrínseca y absorción de impurezas extrínsecas.

La atenuación por absorción intrínseca ocurre cuando un material en estado normal es considerado perfecto mientras que la absorción de impurezas extrínsecas se debe al tipo de impureza que se va introduciendo en el vidrio, en su mayoría iones metálicos como hierro, cobalto y cromo.

La atenuación por dispersión se debe a tres pérdidas principalmente:

- **Atenuación por dispersión intrínseca** Ocurre cuando los rayos de luz dejan de ser guiados por la fibra, perdiéndose a lo largo de la trayectoria; se dice que hay pérdidas por radiación o dispersión.
- **Atenuación por no homogeneidad en el vidrio.** Estas se deben a las variaciones del índice de refracción, menores al tamaño de la longitud de onda de propagación. Las causas se deben a fluctuaciones térmicas en el material y fluctuaciones en la concentración de óxidos en el vidrio. Esto se define mediante la dispersión de Rayleigh, es decir, se deben a la orientación de las moléculas en la estructura sólida del vidrio.

Rayleigh muestra que este efecto es inversamente proporcional a cuatro veces la potencia de la longitud de onda $\frac{1}{\lambda^4}$.

- Atenuación de dispersión por aversión. Esta se deben a las variaciones en la distribución radial del índice de refracción.

5.3.8 Dispersión

La dispersión es otro fenómeno que afecta la transmisión de la señal en las fibras ópticas. Resulta por efecto de las diferentes velocidades con que viajan las longitudes de onda a través de un medio dado.

La Fibra óptica se utiliza como un canal de transmisión de información; es necesario que la luz introducida a la fibra pueda modularse a muy alta frecuencia, e igualmente el detector debe tener un tiempo de respuesta sumamente rápido para poder seguir la señal óptica procedente de la fibra.

La dispersión del material es un factor limite en la capacidad de transmisión de bits, presente en cualquier tipo de cable. El efecto se puede reducir utilizando una fuente de luz monocromática, como el diodo láser. La dispersión en las fibras es la que causa limitaciones en el ancho de banda y está regida por tres mecanismos: dispersión intermodal, dispersión del material y dispersión de la guía de onda, estos mecanismos determinan la dispersión total.

- Dispersión modal. Este no se debe al ancho espectral de la fuente que produce la luz, sino al número de modos que viajan dentro de la fibra y a la diferencia de velocidades entre uno y otro. Para una fibra monomodo, la dispersión modal será igual a cero, en tanto que para una fibra de índice gradual la velocidad de propagación cambia con el tiempo.
- Dispersión del material. Una de las principales razones por la que es necesario hacer un análisis electromagnético y óptico para las fibras ópticas, es porque están hechas en su mayoría de vidrio, y este es un material dispersivo que cambia su índice de refracción en función de la longitud de onda. La causa de la dispersión es simple, ya que si la longitud de onda varía, existen diferentes velocidades de propagación del material.

- **Dispersión de la guía de onda.** Ocurre aún permaneciendo constante el índice de refracción y depende del ancho espectral de la fuente. Si se supone que todos los modos se excitan de igual manera, la llegada será una serie de impulsos de la misma amplitud; tomando en cuenta el efecto de distribución de potencia en los modos.

Para determinar el parámetro de ancho de banda en las fibras ópticas, debemos tomar en cuenta principalmente: el ensanchamiento de los pulsos modal, intermodal y del material; la forma del perfil del índice de refracción, que en la fabricación es difícil controlar; las microdesviaciones que sufre la fibra con el uso e instalación; y la distribución espectral de la fuente de luz que se utilice.

El fabricante elimina en lo posible los efectos de la fuente para que el comprador evalúe su ancho de banda de acuerdo a la fuente que utilice. Una de las características que más interesa en la fabricación de la fibra, es obtener una excitación uniforme de los modos de propagación.

5.3.9 Dispersión cromática

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

5.3.10 Tipos de fibras ópticas

Las fibras ópticas son filamentos, generalmente de forma cilíndrica, que consisten de un núcleo y un revestimiento de vidrio. La principal razón de que existan diversos tipos de fibra se debe a que las aplicaciones son diferentes. Por ejemplo, en las transmisiones con anchos de banda con bajas pérdidas para sistemas de telecomunicación de larga distancia, es mejor utilizar fibras monomodo de diámetro pequeño, mientras que para los sistemas de redes de área local con componentes no caros y fáciles empalmes se utiliza fibra multimodo de diámetro más grande.

FIBRA ÓPTICA EN COMUNICACIONES

Es así, como surge la necesidad de clasificar a las fibras, dependiendo de la forma de propagación que presenten, también denominadas de alta calidad:

- Fibras multimodo: - de índice escalonado
- de índice graduado
- Fibras monomodo: - de índice escalonado (dispersión normal)
- de dispersión corrida
- de dispersión plana

Por su mayor ancho de banda, las fibras monomodo se aplican a enlaces de larga distancia y/o de gran flujo de información: cables submarinos, enlaces interurbanos a 140 Mbps o velocidades superiores, etc.

Fibras multimodo

Se denominan fibras multimodo, porque existen diversos caminos por la cual puede viajar la luz a través de la fibra.

Fibras multimodo de índice escalonado

Las fibras multimodo de índice escalonado son conceptualmente las fibras más simples y las primeras en encontrarles un uso práctico. El núcleo de la fibra multimodo de índice escalonado tiene un índice de refracción mayor que el del revestimiento. El término índice escalonado viene de un cambio brusco en el índice de refracción del material hacia la frontera del núcleo-revestimiento. La diferencia del índice de refracción depende del diseño de la fibra y del material, pero típicamente es mucho menor que el 1% usualmente dado para la luz guiada en fibras de vidrio. Ver figura 5.7.

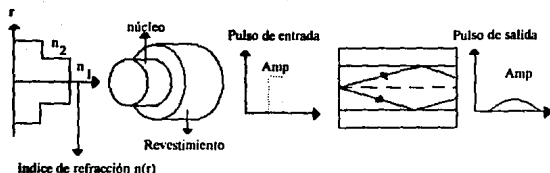


Figura 5.7 Fibra multimodo de índice escalonado

La ventaja principal de la fibra multimodo de índice escalonado es la facilidad de coleccionar luz. Muchas de estas fibras tienen diámetros de núcleos menores a $100\ \mu\text{m}$ y apertura numéricas de 0.2-0.4.

En la fibra multimodo existen algunos parámetros que varían: la composición y el diámetro del núcleo y del revestimiento. Las variaciones de estos parámetros marcan las diferencias cruciales tales como el ancho de banda y la atenuación.

Las fibras multimodo de índice escalonado pueden tener núcleos mucho mayores que $100\ \mu\text{m}$, con las siguientes características, mostradas en la tabla VII:

Tabla VII

Tipo de Fibra	Diámetro núcleo/revestimiento	Atenuación dB/Km @ 850 nm	Ancho de banda MHz·Km	AN
Vidrio	100/140	4	20	0.21
	200/280	4	17	0.21
Plástico	200/380	8	10	0.4
	600/750	12	—	0.4
	200/1000	10	25	0.23
	1000/1260	12	—	0.4

El principal uso de las fibras multimodo de índice escalonado de vidrio con 100/140 son en sistemas de corta distancia, al igual que las fibras de plástico 200/1000 pueden ser usadas en comunicaciones de corta distancia o en otras aplicaciones la eficiencia de coleccionar luz es el principal objetivo.

Para todas las fibras de vidrio y plástico con núcleos de 100 o 200 μm en diámetro, las pérdidas pueden estar por debajo a 3 dB/Km.

Algunas de las fibras multimodo de índice escalonado son diseñadas para aplicaciones especiales, particularmente para resistir a radiaciones nucleares, las cuales pueden causar un daño temporal o permanente. Todas las fibras de plástico presentan importantes ventajas, incluyendo un bajo costo, mejor flexibilidad y facilidad de manejo.

Fibras multimodo de índice graduado

La dispersión modal en una fibra óptica como se había visto, se debe a la diferencia entre los tiempos de recorrido de los diferentes modos que se propagan en la fibra. Con el fin de igualar los tiempos de recorrido de los diferentes modos se utilizan fibras para las cuales el índice de refracción del núcleo n_1 , no es el mismo en todo el núcleo, sino que disminuye gradualmente del centro del núcleo hacia la cubierta. La variación del índice con respecto a la distancia se conoce como perfil del índice.

Se le llama fibra de índice gradual a una fibra cuyo índice aumenta gradualmente de la cubierta hacia el centro del núcleo, siendo esto no tan brusco como las fibras multimodo de índice escalonado, como se muestra en la figura 5.8.

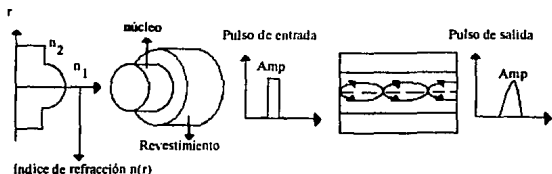


Figura 5.8 Fibra multimodo de índice gradual

Las fibras de índice gradual tienen núcleos más pequeños que las fibras multimodo de índice escalonado, típicamente son de 50-85 μm con variaciones de 125 μm a 100 μm . Estos diámetros son lo suficientemente capaces y fáciles de acoplar a las tolerancias, acarreado muchos modos de propagación.

El índice de refracción gradual en esta fibras provoca que la trayectoria de la luz a través de la fibra dependan de la refracción más que de la reflexión total interna, por lo tanto la luz entra a la fibra con diferentes ángulos, esencialmente a las mismas distancias.

El índice gradual en esta fibras reducen de alguna forma la dispersión modal, es decir, lo único es que minimizan el tiempo que toma la luz en pasar a través de la fibra, cabe señalar que esta fibras no fueron diseñadas exclusivamente para reducir esta dispersión, pero si la reducen grandemente.

Típicamente las fibras de índice gradual tiene anchos de banda de 100-1,000 MHz-Km o más a sus longitudes de onda normales de operación 850 o 1,300 nm.

Fibras Monomodo

En estas fibras el índice de refracción del núcleo es constante y tienen un sólo modo de propagación, pues permite que la luz viaje a través de una sola trayectoria a lo largo del núcleo, evitando la dispersión modal.

Fibras monomodo de índice escalonado

El número de modos que una fibra de índice escalonado multimodo puede tener dependen de muchos factores incluyendo el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, la longitud de onda de operación y el tamaño del núcleo de la fibra. Estos factores se relacionan de la siguiente manera:

$$N_m = \left(\frac{D \times AN \times \pi \lambda}{2} \right)^2 \quad (5.18)$$

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

donde:

- N_m = Número de modos
- D = Diámetro del núcleo
- AN = Apertura numérica
- λ = Longitud de onda

Por lo tanto, apartir de ésta fórmula, existen tres caminos para reducir el número de modos para obtener una fibra monomodo: reducir el diámetro del núcleo, la apertura numérica o incrementando la longitud de onda.

La longitud de onda generalmente se relaciona por consideraciones tales como la atenuación, reduciendo grandemente la apertura numérica puede provocar que sea imposible que la luz se pueda acoplar dentro de la fibra. Es por eso que la mejor manera de reducir los modos de propagación es reduciendo el diámetro del núcleo. Pero esto no es posible si consideramos solamente la ecuación 5.18 y girar todo dentro del diámetro D . La derivación propia requiere de las funciones de Bessel, las cuales son de un estudio muy complejo, por lo que consideraremos apartir de estas funciones, la condición para determinar los modos de operación para la fibra de índice escalonado, ver figura 5.9.

$$D < \frac{2.4\lambda}{\pi \times AN} \quad (5.19)$$

Para una AN de 0.15, el diámetro del núcleo debe no ser mayor que cinco veces la longitud de onda, si un AN de 0.1, el núcleo deberá ser 7.6 veces la longitud de onda. Estas consideraciones permiten a los diámetros de núcleo de 10 μm o menores.

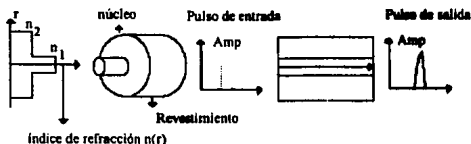


Figura 5.9 Fibra monomodo de índice escalonado

Por razones de manejo el revestimiento de las fibras monomodo deben ser menores a 125 μm , doce veces o más del diámetro del núcleo.

La dispersión modal en las fibras monomodo de índice escalonado 1,300 nm no le afecta, ya que solo existe un modo de propagación, en cambio la dispersión cromática si está considerada, ya que ésta no depende del rango de la longitud de onda transmitida por la fibra. Las fibras monomodo se encierran en longitudes de onda de 1,300 nm, donde se presenta baja atenuación.

La dispersión cromática es igual a cero solo en una longitud de onda, pero todas las fuentes de luz emiten un rango de longitudes de onda.

Las pérdidas en las fibras monomodo tienden a ser menores que en las fibras multimodo. Para estas fibras se tienen atenuaciones de 0.4-0.5 dB/Km a 1,300 nm.

Pero esta longitud de onda no es la que produce la atenuación más baja, ya que si consideramos una longitud de onda de 1,550 nm, se tendrán atenuaciones de 0.16 dB/Km, muy cercano a la teoría.

Fibras monomodo de dispersión corrida

Como se vió anteriormente la dispersión cromática de una fibra monomodo es la suma de la dispersión del material y de la dispersión de la guía de onda. La dispersión del material depende de la composición del material, mientras que la dispersión de la guía de onda ocurre porque la luz viaja rápidamente en el revestimiento de bajo índice que el del núcleo de mayor índice (la diferencia como la dispersión del material dependen de λ).

El grado de dispersión de la guía de onda depende no solamente del material sino que también del como la luz es dividida entre el núcleo y el revestimiento, lo cual es consecuencia del diseño, el cual puede ser alterado, por lo que, si se cambia la dispersión de la guía de onda este ofrece un camino con dispersión cero donde la dispersión de la guía de onda y del material se cancelan a 1,550 nm.

Como se ha visto la interfase entre el núcleo y el revestimiento en una fibra monomodo convencional es un índice de refracción escalonado, donde la composición del vidrio cambia bruscamente. Este tipo fue escogido originalmente por la facilidad de diseño.

Cambiando la dispersión de la guía de onda a una fibra de dispersión corrida requiere de un diseño más elaborado que divide la luz de manera diferente entre el núcleo y el revestimiento. En la figura 5.10 se muestra un segmento del núcleo de dispersión corrida.



Figura 5.10 Fibra monomodo de dispersión corrida

En este tipo de diseño de la dispersión de guía de onda a $1,550 \text{ nm}$ es igual en magnitud pero inversa a la señal de dispersión del material, por lo que la dispersión cromática es igual a cero.

Existen dos factores que afectan al diseño de las fibras de dispersión corrida, difíciles de evitar. El primero es la atenuación, que tiende a ser más alta en la dispersión corrida que en la fibra monomodo de índice escalonado, porque la luz es acarreada a las pérdidas del revestimiento.

El problema más característico es el concerniente a los efectos de medición por la longitud de onda de corte, donde la fibra puede empezar a soportar un segundo modo de guía de onda.

Como se mencionó anteriormente el número de modos en una fibra óptica que pueden transmitirse dependen del diámetro del núcleo, la AN y la longitud de onda. En una fibra monomodo una longitud particular tal como $1,300 \text{ nm}$, puede empezar a acarrear dos modos en la misma longitud de onda de corte.

La fibra de dispersión corrida no pretende desplazar o hacer obsoleta a la fibra monomodo de índice escalonado. El diseño es más complejo, duro y más costoso de producir, sin embargo ésta ofrece una alternativa de alto rendimiento, donde es posible minimizar el número de repetidores.

Fibra monomodo de dispersión plana

Tanto la fibra monomodo de dispersión plana como la de dispersión corrida comparten una limitación en la transmisión. A pesar de que la atenuación es baja en la región de 1,300-1,600 nm y la dispersión es baja solamente en una sola longitud de onda, ésta no causa ningún problema si las señales de velocidad alta son transmitidas en una sola longitud de onda, pero también presenta obstáculos al expandir la capacidad para señales de transmisión simultánea a 20 o más longitudes de onda diferentes. La técnica es denominada entonces como multiplexaje por división de longitud de onda.

Las fibras de dispersión corrida están diseñadas para proporcionar dispersión cero a una longitud de onda.

La principal ventaja que tienen las fibras monomodo de dispersión plana es que estas pueden tener una baja dispersión sobre un rango de longitud de onda, lo que las hace más eficientes en el campo de las comunicaciones.

En la figura 5.11 se muestra una gráfica comparativa del comportamiento de las fibras monomodo.

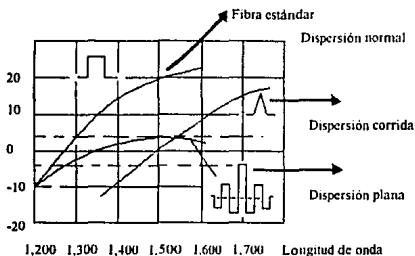


Figura 5.11 Perfil característico de las fibras monomodo

5.4 CONECTORES Y EMPALMES

Para la realización práctica de los sistemas de fibra óptica es necesario utilizar dispositivos de interconexión, como empalmes y conectores. Las pérdidas que introducen estos dispositivos de interconexión pueden constituir un factor muy importante en el diseño de sistemas de fibra óptica, particularmente en enlaces de telecomunicación de varios kilómetros.

En el mundo de la fibra óptica, los conectores no son solamente el modo de hacer conexiones. El término "conector" tiene un significado específico, es decir, es un dispositivo que hace una conexión temporal entre dos extremos de fibra o entre una terminación de fibra y un transmisor o receptor. El conector típicamente es montado al final de la fibra, existen otros modos de hacer conexiones mediante una unión permanente entre dos fibras, la cual se denomina "empalme".

El incremento en las pérdidas de un enlace es el factor más importante que introduce cualquier unión de fibras ópticas, por lo cual, deben considerarse sus causas y la magnitud de sus efectos.

Los conectores eléctricos se localizan en módulos electrónicos, audio o en equipos telefónicos. El principal propósito es conectar eléctrica y mecánicamente dos dispositivos, como un cable y un amplificador.

Los conectores que se usan en fibra óptica realizan el mismo trabajo, pero la señal que se transmite es luz y no electricidad como en el cable. Es decir, que los electrones pueden seguir un camino a través del conductor eléctrico, mientras que en los núcleos de la fibra de entrada y salida de un conector tienen que estar debidamente alineados uno con respecto al otro.

Los conectores eléctricos son usados en equipos de audio y en teléfonos, porque supuestamente las conexiones no son permanentes, es por eso que los conectores se usan de la misma forma en los enlaces de fibra óptica.

Las conexiones permanentes tienen algunas ventajas, incluyendo mejor estabilidad mecánica y especialmente para las fibras ópticas pérdidas bajas de señal. En el mundo de la fibra óptica los conectores y empalmes están lejos de ser intercambiables. Los conectores normalmente son usados en los extremos de los sistemas para unir cables a los transmisores y receptores. Un conector puede localizarse entre un sistema de larga distancia y un sistema local. Los empalmes son usados donde las uniones son permanentes o donde la pérdida del empalme es crítica.

5.4.1 Atenuación en los conectores

El parámetro principal de los conectores en la fibra es la atenuación; la fracción de señal perdida dentro del conector. Esta pérdida es medida en decibeles. La mejor atenuación que se presenta en los conectores está por debajo a 1 dB. El tipo de la fibra es una variable importante en el rendimiento del conector, debido a los diferentes modos que entran y salen de la fibra. Muchos conectores están diseñados para tipos específicos de fibra.

Cuando la luz va entre dos fibras, generalmente ésta pasa a través de dos conectores, sin embargo, las pérdidas de un conector simple no es tan significativa. Los conectores pueden ser montados en transmisores y receptores aunque los detalles difieren, los principios son los mismos.

La atenuación de un conector es la suma de las pérdidas causadas por diversos factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales son fáciles de aislar en la teoría que en la práctica.

La fibra óptica es un canal de transmisión o de propagación de la luz, que tiene características propias ligadas a su capacidad de propagación del flujo energético.

Las pérdidas intrínsecas de la fibra son ocasionadas por variaciones en la geometría de la fibra y sus características de diseño, estas pérdidas también tienen un efecto importante en las pérdidas totales del sistema. Los parámetros de variación en la geometría son:

1. **Variación del diámetro del núcleo.** La propagación se realiza de una fibra 1 hacia una fibra 2, como se muestra en la figura 5.12, la fibra 1 constituye entonces el emisor

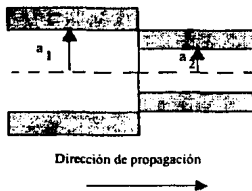


Figura 5.12 Acoplamiento entre dos fibras con núcleos diferentes

Si se supone una distribución homogénea de modos en la fibra 1, el flujo energético es proporcional a la superficie. La pérdida en el acoplamiento es entonces;

$$\begin{aligned} \text{Si } a_1 > a_2 \quad D_c &= 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad D_c = 10 \log \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \\ \text{Si } a_1 < a_2 \quad D_c &= 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Este tipo de pérdida lo encontramos en dos casos: el primero es cuando las dos fibras por acoplar son diferentes; por ejemplo el acoplamiento de una fibra con diámetro de núcleo igual a 60 μm con una fibra de 50 μm , es evidente que en este caso es necesario que se evite. El segundo caso es cuando se acoplan dos fibras con el mismo diámetro de núcleo. Si se consideran las limitaciones de fabricación, es imposible obtener un diámetro constante, por lo que existen variaciones en el diámetro. Cuando se acoplan dos fibras idénticas hay, por tanto, pérdidas asociadas a las tolerancias en diámetro.

2. Variación de la apertura numérica. Si la fibra 2 tiene una apertura numérica inferior a la del emisor, todo el flujo energético emitido por la fibra 1 no se acopla a la fibra 2. La pérdida es:

$$\begin{aligned} \text{Si } AN_2 < AN_1 \quad D_{AN} &= 10 \log \left(\frac{AN_2}{AN_1} \right)^2 \\ \text{Si } AN_2 > AN_1 \quad D_{AN} &= 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Este tipo de pérdida se puede producir cuando se escogen deliberadamente dos fibras de aperturas numéricas diferentes o de tolerancia de fabricación sobre la apertura numérica de una misma fibra. Puede ser que estas tolerancias repercuten en una disminución en las pérdidas, se puede esperar que la pérdida descienda hasta -2.1 dB. Sin embargo, en el cálculo de las pérdidas de un enlaces, se deben considerar las peores condiciones.

3. Variación del perfil del índice. En una fibra óptica con gradiente de índice, la distribución de los modos en la fibra depende del parámetro α . Si se acoplan dos fibras con diferentes perfiles del índice, ciertos modos que se propagan en la primera fibra no podrán propagarse en la segunda. Lo que resulta una pérdida dada por:

$$\begin{aligned} \text{Si } \alpha_2 < \alpha_1 & \quad D_o = 10 \log \frac{\alpha_2(2 + \alpha_1)}{\alpha_1(2 + \alpha_2)} \\ \text{Si } \alpha_2 > \alpha_1 & \quad D_o = 0 \end{aligned} \quad (5.22)$$

Cada fibra posee sus propias características intrínsecas; así, cuando se unen o se conectan dos fibras, hay un defecto de continuidad en el mecanismo de propagación, lo que puede causar pérdidas.

Las pérdidas extrínsecas de la fibra son causadas por desalineamiento mecánico de la unión de las fibras. Este desalineamiento causa pérdidas de radiación ya que el cono de radiación de la fibra emisora no compagina con el cono de aceptación de la fibra receptora. Las pérdidas son las siguientes:

- Desalineamiento axial
- Desalineamiento angular
- Distancia entre dos fibras
- No-perpendicularidad de las caras de las fibras
- Estado de las superficies
- Pérdidas de reflexión (Fresnel)

- **Desalineamiento axial.** Ocurre cuando el eje del núcleo de una fibra es paralelo al eje del núcleo de la otra fibra, pero los dos ejes no son colineales, como se muestra en la figura 5.13.

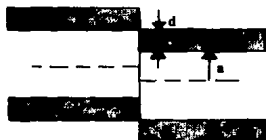


Figura 5.13 Acoplamiento entre dos fibras idénticas con desalineamiento axial

La transferencia del flujo energético sólo se realiza en las porciones coincidentes de las superficies de los núcleos.

- **Desalineamiento angular.** Los ejes de las dos fibras forman un ángulo θ , como se muestra en la figura 5.14, este ángulo produce una variación artificial en la apertura numérica puesto que los rayos que salen de la fibra 1 alcanzan la cara de la entrada a la fibra 2 con un ángulo superior a α_{max} , donde $\text{sen } \alpha_{\text{max}} = AN$.

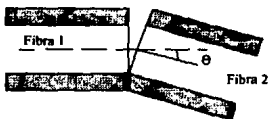


Figura 5.14 Acoplamiento entre dos fibras en el cual sus ejes forman un ángulo

- **Distancia entre dos fibras.** La apertura numérica también causa pérdidas debido a la separación entre los extremos de un conector. La pérdida por acoplamiento depende de la superficie del punto luminoso a una distancia d de la fibra 1, como se muestra en la figura 5.15.

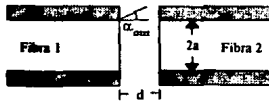


Figura 5.15 Distancia entre dos fibras

- **Caras no perpendiculares y estado de las superficies.** Si la cara de una fibra no es perpendicular a su eje, vuelve a tenerse una pérdida comparable a la que resulta del desalineamiento angular. Si las caras de las fibras no tienen superficies pulidas, la difusión en las irregularidades produce pérdidas suplementarias. Una forma de remediar este problema es poner entre las dos caras un liquido adaptador de indice; así se elimina la refracción de las fronteras entre la fibra y el aire, ver grafica 5.16

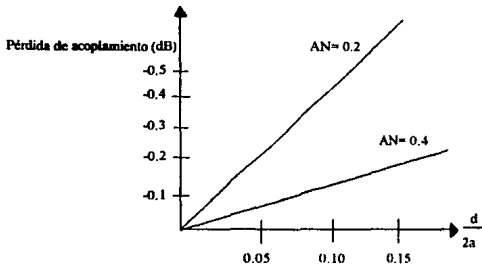


Figura 5.16 Variación de la pérdida en función de la separación relativa entre las fibras

- **Pérdidas por reflexión.** Cuando la luz pasa de una fibra a otra, atraviesa dos fronteras, cada una de las cuales introduce pérdidas por reflexión, estas pérdidas son de aproximadamente -0.3 dB por interfaz, o sea -0.6 dB en total. Si se interpone entre las dos caras un líquido con el mismo índice que el de los núcleos de las fibras, se suprimen las pérdidas de Fresnel. Las pérdidas de Fresnel dependen de la diferencia entre los índices de refracción entre el núcleo de la fibra y el aire.

Otros factores pueden causar pérdidas en los conectores. Hasta el momento se ha asumido que los extremos de la fibra están perfectamente cortados y perfectamente perpendiculares al eje de la fibra, sin embargo, los extremos pueden ser cortados con un ligero ángulo, causando una pérdida que depende del tamaño del ángulo y de la manera en que los extremos de la fibra estén alineados uno con respecto al otro. Otras pérdidas se deben a que las fibras no sean suaves o que exista alguna suciedad en el conector.

5.4.2 Tipos de conectores

Ahora ya se sabe que mecanismos provocan pérdidas en los conectores, por lo que es necesario utilizar diferentes tipos de conectores en las fibras ópticas.

Los conectores utilizan técnicas de alineación con tubos, esferas, moldes o por ajuste óptico. Un conector está generalmente constituido por dos partes: el casquillo que permite centrar y sostener la fibra, y el manguito guía que alinea y sostiene juntos los dos casquillos (uno por cada fibra). Los casquillos son de diferente tipos, según sea la técnica de alineación escogida:

Conectores de férula o casquillo

En estos conectores, la fibra óptica se coloca dentro de un casquillo protector de precisión, en la unión se deben alinear los casquillos y cuidar que los extremos del conector estén pulidos. Es importante mantener la concéntrica entre la fibra y el casquillo, ya que de ello dependen las pérdidas en el conector.

Existe una gran variedad de conectores de este tipo:

- a) **Conector FC.** En donde la fibra es descansada en un casquillo que contiene en su interior una capilaridad concéntrica encargada de centrar y fijar la fibra. Al montar la fibra en el conector, ésta es preparada con resina epóxica en la cavidad del casquillo para lograr la fijación adecuada de la fibra, es necesario realizar un pulido con u equipo automatizado. El casquillo generalmente es de cerámica y cubierta de acero.

Para el caso de las fibras monomodo las pérdidas que se presentan en estos conectores están entre 1 y 0.6 dB, pero éstas pueden ser menores mejorando la técnica de pulido (superficie más plana).

El diseño FC-PC (physical contact), presenta en la punta del casquillo, en lugar de una superficie plana una superficie esférica de un radio aproximado de 60 mm para que las fibras estén en un contacto real físico en la unión, como se muestra en la figura 5.17. Esto reduce las reflexiones y las pérdidas menores a 0.5 dB por conector.

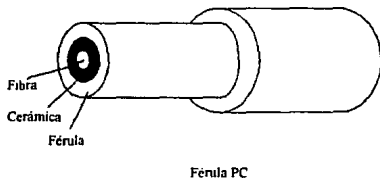


Figura 5.17 Conector tipo FC-PC

- b) Conector tipo SMA.** Es un conector utilizado comúnmente en equipos de transmisión de datos. Este conector es de un tamaño muy pequeño, buena durabilidad y amplia disponibilidad en el mercado.

Es uno de los conectores más fáciles de ensamblar ya que requiere de un mínimo de herramientas y de habilidad. Las pérdidas de estos conectores no son tan bajas como los conectores FC-PC, estas oscilan entre 0.7 y 2 dB. La cubierta externa del conector puede estar elaborada de diferentes materiales dependiendo de la aplicación (acero, bronce niquelado o plástico), mostrado en la figura 5.18.

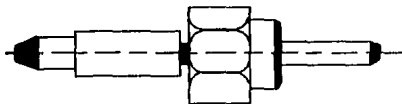


Figura 5.18 Conector SMA

- c) Conector D4.** Es muy similar al FC y generalmente se le conoce como D4-FC. Este conector tiene pérdidas aproximadas de 0.7 dB y una durabilidad de 1,000 inserciones, generalmente utilizado en equipo de telecomunicaciones.

Conectores bicónicos

Este tipo de conectores es usado generalmente en las fibras multimodo, el cual consiste de dos conos concéntricos que se encargan de alinear la fibra en el casquillo obteniéndose pérdidas menores a 1 dB. El casquillo es elaborado de cerámica encapsulado en metal y la cubierta es de cuarzo combinado con material epóxico, incluyendo un resorte para ajustar el punto de contacto. Este tipo de conector se muestra en la figura 5.19.

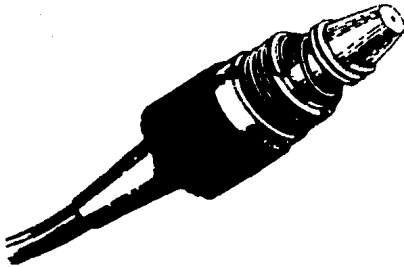


Figura 5.19 Conector Bicónico

Conectores de excentricidad ajustable

En estos conectores se logra un alineamiento transversal preciso al rotar una fibra con respecto a la otra, cuando ambas están excentricamente montadas. El alineamiento óptico se logra cuando la señal monitoreada a través del conector es máxima, y en la cual se tienen pérdidas menores de 0.5 dB en las fibras monomodo.

Una vez hecho el ajuste del conector para la fibra montada, se fija para que no sea alterada, aunque la necesidad de hacer un ajuste, la mayor complejidad del conector y su mayor costo son desventajas, la precisión lograda mediante este método es única.

El ajuste se hace mediante cuatro tornillos radiales diferenciales con auxilio de una herramienta especializada; el segundo alineamiento se lleva a cabo entre los casquillos a unir, éstos son insertados en una esfera con un orificio, asegurando así que los ejes axiales de ambos casquillos y ambas fibras coinciden.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

Muchos de los conectores están diseñados para ser usados en el interior, protegidos de condiciones ambientales, mantenerse libre de contaminantes es más importante que para los conectores eléctricos.

La suciedad y el polvo en los extremos de la fibra o dentro del conector pueden espacir o absorber luz, causando pérdidas excesivas en el conector y un desempeño pobre del sistema. Es por eso que la mayoría de los conectores vienen con cubiertas para evitar la entrada del polvo, esta pequeñas cubiertas deben ser montadas siempre que el conector no sea conectado en cualquier período de tiempo.

El interés militar en las comunicaciones por fibra óptica en el campo de batalla han llevado al desarrollo de usar conectores herméticamente sellados para utilizarse en los exteriores. Los conectores deben ser resistentes en el campo, resistir a la influencia del agua y para estos se requiere de especiales selladores y técnicas de montaje. Otro problema que es necesario considerar en los conectores es la durabilidad

La especificación más importante en el conector es la atenuación de la señal óptica, sin embargo, existen otros factores que son importantes en la selección del uso de los conectores.

- **Compatibilidad**, es la habilidad de igualar diferentes conectores sobre una misma consideración. Algunos diseños de conectores son fabricados de acuerdo a normas y estos pueden ser utilizados con otro tipo de conectores diseñados por otros fabricantes. Los tipos más comunes son equivalentes al conector SMA, bicónico usado en sistemas de telecomunicaciones.
- **Tamaño de la fibra**, es importante considerarlo debido a las tolerancias en el acoplamiento de luz entre las fibras. Muchos de los conectores requieren fibras de un diámetro particular.
- **Tolerancia**, es otro factor que debe ser considerado.

Típicamente una familia de conectores incluyen diferentes modelos, cada uno diseñado de acuerdo a las especificaciones de cada fibra.

Los conectores para las fibras monomodo exigen alineamientos superiores en un orden de magnitud a los tolerados para fibras multimodo. En particular, para fibras con $125\mu\text{m}$ y $5\text{-}10\mu\text{m}$ para los diámetros del revestimiento y el núcleo respectivamente, se exigen desplazamientos laterales, entre núcleos, menores de $1\text{-}2\mu\text{m}$ para obtener pérdidas inferiores a 1 dB .

Se han descrito varios conectores desmontables, que se emplean para unir fibras de núcleo pequeño (generalmente de 5 a $10\mu\text{m}$ de diámetro). El conector capilar cerámico se ha utilizado con fibras monomodo. Se han señalado pérdidas medidas de 0.5 dB con fibras de núcleo de $10\mu\text{m}$ de diámetro para una longitud de onda de $1.3\mu\text{m}$.

Asimismo, el conector de varillas y el conector bicónico han sido experimentado con fibras monomodo. Las pérdidas observadas han sido aproximadamente de 1.0 y 0.7 dB respectivamente.

5.4.3 Empalmes

Los empalmes son conexiones permanentes entre las fibras. Después de ser alineadas las dos fibras son soldadas entre ellas. Se utiliza un empalme para unir permanentemente tramos largos de fibra en cables para aplicaciones donde la distancia que ha de cubrir el sistema es mayor que los tramos de fibra disponibles.

Los empalmes son usados generalmente en enlaces de larga distancia de alta capacidad mientras que los conectores son usados en enlaces de corta distancia de baja capacidad. Alternativamente los empalmes se usan para unir segmentos de cables de larga distancia mientras que los conectores unen segmentos de cable y aparatos terminales; los empalmes son usados en el interior a diferencia de los conectores que son usados en el exterior. En la siguiente tabla VIII se muestran las ventajas que existen entre los empalmes y los conectores.

Tabla VIII

Conectores	Empalmes
No-permanentes	Permanentes
Instalación en el campo	Pérdidas bajas al empalmarse en campo
Fácil reconfiguración	Baja atenuación
Fácil manejo	Herméticamente sellados

Es extraño ver como ventaja permanente en un empalme y no-permanente una ventaja de los conectores. Si embargo, en ciertas aplicaciones una característica o la otra puede ser aconsejable, por ejemplo, si un cable subterráneo se ha quebrado, la reparación debe ser permanente. Sin embargo, uniones permanentes no son aconsejables entre una red de área local y terminales que deben ser movidas dentro de una misma construcción.

La baja atenuación de los empalmes es una ventaja crucial en sistemas de larga distancia. La fibra desnuda normalmente viene en rollos de longitudes estándar de 1 a 12 Km. Los sistemas de fibra óptica de alta velocidad con docenas de repetidores en la trayectoria están unidos por empalmes en segmentos cortos de cable. Si los empalmes son instalados en ductos subterráneos, estos son instalados en registros con longitudes de cables dependientes de estos. Si en un empalme es necesario cada kilómetro en un sistema de 30 Km, el total de pérdidas de los 29 empalmes con una atenuación de 0.1 dB, la atenuación será de 2.9 dB mientras que si se usara conectores la pérdida por cada uno sería de 0.7 dB y por lo tanto la atenuación total sería de 20.3 dB demasiado alta para que un sistema no pueda operar adecuadamente.

Las características físicas de los empalmes son importantes en muchas aplicaciones de sistemas de larga distancia. Si los cables son empalmados, los empalmes deben soportar las condiciones ambientales incluyendo si estos se localizan en el océano. Aunque muchos empalmes están diseñados para ser re-abiertos, si se separa o se cambian deben ser sellados herméticamente.

Existen tres principales aspectos en un empalme; la atenuación en el empalme terminado, su duración física y la facilidad de empalmar.

Los empalmes en los sistemas de fibra óptica están sujetos a mecanismos de atenuación, sin embargo, los métodos usados para empalmar las fibras producen tolerancias estrechas y por tanto atenuaciones más bajas que en los conectores. Algunas fuentes de pérdidas de conexión son esencialmente eliminadas en los empalmes; otras son grandemente reducidas. En un empalme, los dos extremos de la fibra se aseguran ya sea fundiéndolas, engomándolas o sosteniéndolas mecánicamente entre ellas en una estructura estrechamente limitada.

Algunas pérdidas pueden ocurrir si los extremos de la fibra están separados por un agente como un material epóxico transparente, pero las pérdidas son mínimas si el índice de refracción del material es cercano al vidrio y si la capa intermedia no es tan gruesa.

Las pérdidas que se producen en los empalmes se dividen en dos categorías; intrínsecas y extrínsecas, muchas de ellas son análogas a las que se producen en los conectores.

Las pérdidas intrínsecas surgen de las diferencias que hay entre las dos fibras que se conectan. Estos mecanismos de pérdida incluyen variaciones en el núcleo de la fibra, en el diámetro exterior, en la diferencia en el perfil, elipticidad y excentricidad del núcleo. Estos puede ocurrir hasta en fibras con especificaciones normalmente idénticas debido a variaciones inevitables en el proceso industrial.

Las pérdidas extrínsecas son aquellas que surgen de la naturaleza misma del empalme. Estas incluyen la alineación de la fibra, calidad, contaminación, coincidencia del índice de refracción entre los extremos, distancia entre los extremos, imperfecciones en la unión de las guías de onda y desalineamiento angular en las fibras. Afortunadamente, los dos tipos de pérdidas dan lugar a la pérdida total del empalme que puede ser menor que la suma de ellas.

En un empalme no bien hecho se puede generar suciedad en las uniones o en uniones imperfectas sufriendo pérdidas altas, por ejemplo, en una fibra de 10 μm las partículas de polvo pueden bloquear la transmisión a través de un empalme en una fibra monomodo. Sin embargo, en empalmes bien elaborados, las pérdidas pueden ser bajas.

La pérdida promedio en los empalmes de fusión están usualmente por debajo de 0.1 dB cuando se tienen fibras con idénticas especificaciones. Sin embargo, las pérdidas en empalmes individuales pueden ser más altas, es por eso que los fabricantes normalmente especifican atenuaciones menores a 0.2-0.25 dB permitiendo variaciones normales.

En las fibras multimodo las pérdidas son similares o ligeramente más bajas, donde mayores tamaños de núcleo facilitan las tolerancias. Típicamente las atenuaciones son más altas para los empalmes mecánicos.

Es posible físicamente empalmar fibras diferentes, tal como empalmar una fibra monomodo a una multimodo, o hasta varias fibras de diámetro pequeño a fibras de diámetro mayor.

Si se jalara un alambre de metal empalmado, se esperaría que parte del empalme fallara, éste no es necesariamente el caso de la fibras ópticas. Las fibras son cuidadosamente empalmadas en la fábrica mediante procesos de fusión que soportan aproximadamente las mismas pruebas de tensión que las fibras que no están empalmadas. Si embargo esto no ocurre siempre para otro tipo de empalmes, incluyendo empalmes de fusión realizados con condiciones no estrictamente controlados. Los empalmes de fusión son análogos a soldar piezas de metal, al igual que esto la contaminación de la soldadura hasta por factores aparentemente inocuos como, huellas dactilares que pueden debilitar el empalme.

Las pérdidas en los empalmes son esencialmente mucho más sensibles al desplazamiento transversal y a la desviación de los ejes que al desplazamiento longitudinal. Por ejemplo, un desplazamiento transversal de 0.14 de radio del núcleo o una desviación de los ejes de 1 grado (para una fibra de $AN=0.20$) dará lugar a una pérdida en el emplame de 0.25 dB. La temperatura requerida en las uniones deben estar a 2,000 °C, las temperaturas demasiado bajas pueden formar una soldadura fría en el empalme con altas pérdidas y durabilidad mecánica baja. Las temperaturas excesivas también puede debilitar el enlace físico entre las fibras y causar pérdidas excesivas.

Los empalmes, por lo general son instalados en el campo lo que ha provocado que se desarrollen equipos especializados para empalmar las fibras.

5.4.4 Técnicas de empalme

Existen dos técnicas básicas para realizar empalmes:

1. Mecánicos
2. De Fusión

1. Empalmes mecánicos

Los empalmes mecánicos generalmente se utilizan en sistemas de corta distancia en donde se puedan tolerar pérdidas considerables a través de medios mecánicos, como ranuras en forma de "V", varillas (de acero o vidrio) o esferas.

Método de varillas

Este es uno de los primeros utilizados en los empalmes mecánicos. Por lo general se utilizan 3 varillas de acero o vidrio acomodados como se muestra en la figura 5.20. Se centra la fibra por medio de tres áreas circulares situadas en un mismo plano.

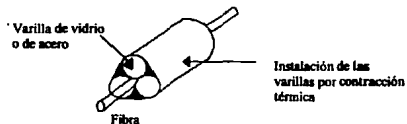


Figura 5.20 Método de las varillas

Se puede agregar una sustancia epóxica para adherir las fibras y además actuar como acoplador óptico, las varillas son de un diámetro mucho mayor que el de la fibra y deben tener dimensiones muy precisas con tolerancias menores a $0.04 \mu\text{m}$. Se tienen otros tipos de empalmes utilizando cuatro y seis varillas con la cual se tienen más puntos de alineamiento y menor volumen en el empalme, como se muestra en las figuras 5.21.

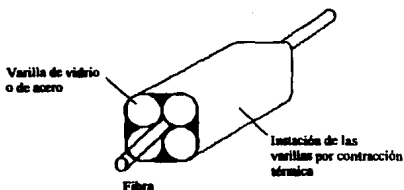


Figura 5.21 Método de las cuatro varillas

Método de ranura en "V"

El método más utilizado de empalme mecánico es el de ranura en "V" (V-Groove), en el que las fibras ya cortadas y preparadas se colocan en ambos extremos de una ranura acanalada en forma de "V", que alinea las fibras para su unión, y se agrega un adhesivo con un índice de refracción igual al del núcleo de la fibra, como se muestra en la figura 5.22.



Figura 5.22 Método de ranura en "V"

La unión se logra mediante una tapa que sujete las fibras, manteniéndolas en contacto. El material acanalado puede ser silicón, plástico, material cerámico, acero o aluminio. Las fibras se unen en la mitad del canal y se ponen en contacto con la ayuda de bloques móviles supervisando la unión ya sea a simple vista o con una lupa.

También puede utilizarse una tapa con otra ranura en "V", figura 5.23 e inclusive existe un disco con tres secciones ranuradas, estas ofrecen una alineación de la fibra en forma más precisa con la desventaja que requieren más piezas de precisión, lo cual eleva el costo.



Figura 5.23 Variaciones del método de ranura en "V"

Con este método se tiene la limitación de unir solo fibras con diámetros de revestimiento iguales y con una alta concentricidad. Las ventajas del método son: su facilidad y rapidez de elaboración. La pérdida del empalme es de hasta 1 dB.

Método elastomérico

Otro tipo de empalme mecánico es el empalme elastomérico mostrado en la figura 5.24, el cual consiste de dos tubos de material elástico con un pequeño orificio en el centro y de diámetro ligeramente menor que el del revestimiento de la fibra, con un ensachamiento en ambos extremos del orificio para facilitar la inserción de la fibra. Cuando se efectúa la inserción, el diámetro del orificio se expande de tal forma, que el material elástico ejerce una fuerza simétrica sobre la fibra. Esta fuerza hace que los ejes de las fibras a unir queden automáticamente alineadas sin importar si son de diferente diámetro. Además con ello se eliminan las fallas angulares y radiales reduciendo las pérdidas en el empalme.

Los fabricantes de este tipo de empalmes informan que la pérdida máxima está cerca de 0.25 dB para las fibras multimodo.

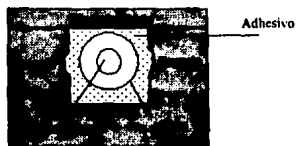


Figura 5.24 Empalme tipo elastométrico

Otros métodos

Existen distintos elementos mecánicos que actúan para alinear las fibras a unir. El más sencillo es el empalme por tubo en donde se tiene una pieza de vidrio u otro material, con un orificio en forma de tubo y con un diámetro ligeramente mayor al de la fibra a unir, incluyendo un orificio lateral para el adhesivo.

Si tiene el inconveniente de que es fácil introducir en un orificio tan pequeño y además la pieza debe tener una gran precisión en su construcción para evitar un desalineamiento en la unión, como se muestra en la figura 5.25.

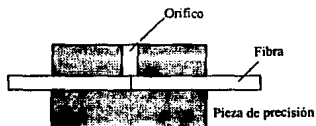


Figura 5.25 Empalme con orificio

Una variación de este método es el empalme "crimpeado". En este método el tubo tiene un diámetro mayor y es menos elaborada en su construcción. Se tiene una herramienta especializada que comprime en forma precisa el tubo para que queden alineadas a la fibra, figura 5.26.

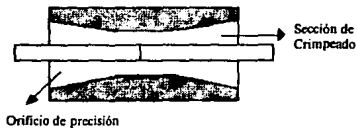


Figura 5.26 Empalme crimpeado

Otra variación al método es aquel que utiliza un tubo con dobleces de 15 grados en sus extremos. La construcción puede hacerse con cuatro pequeñas varillas de vidrio. Los dobleces obligan a la fibra apoyarse en la ranura que forman dos de las varillas quedando así alineadas.

También existen empalmes mecánicos que se basan en esferas macizas, entre los cuales se alinean las fibras. En la mayoría de los empalmes que utilizan adhesivo, estos deben curarse con luz ultravioleta en ambientes limpios.

2. Empalme de fusión

El empalme de fusión es el método más utilizado mediante soldadura en los extremos de las fibras a unir, este consiste en aplicar calor en una zona específica entre las fibras, suavizándolas y fusionándolas. Las fibras deben prepararse precisamente en sus extremos quitándoles las cubiertas secundaria y primaria, cortando las caras de los extremos para que estén planas y perpendiculares al eje, limpiando la fibra de grasa y polvo, a continuación la fibra se monta ya sea en una base ranurada o en sujetadores controlados por microposicionadores accionados por motores o manualmente, con la libertad de poder moverse en las tres direcciones para obtener un alineamiento óptimo, supervisando mediante un microscopio.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

Cuando los extremos de la fibra presentan imperfecciones pueden generarse burbujas de aire y deformaciones del núcleo durante la elaboración del empalme. Para evitarlo se hace una prefusión, la cual consiste en aplicar calor durante un lapso muy pequeño, mucho menor que en la fusión, con lo que se redondean los extremos suavizando la superficie, evitando con esto las imperfecciones.

Para aplicar calor a la unión se utiliza principalmente un arco eléctrico aunque también se tiene fusión o por gas, para evitar algún movimiento, está es sujeta por un sistema de bloques móviles o por sujetadores mecánicos.

El tiempo de fusión y el calor aplicado deben estar cuidadosamente controlados para obtener un empalme eficiente. Para la optimización de este método, se alimenta luz en un extremo de una de las fibras a empalmar y en la otra fibra se recoge la luz de la misma forma. Este procedimiento puede efectuarse automáticamente sin intervención del operador.

La mayoría de los empalmes de fusión tienen pérdidas de 0.2 dB o menor, frecuentemente son menores a 0.1 dB.

Una vez hecho el empalme por fusión se debe proteger con una cubierta que sustituya las cubiertas primaria y secundaria de la fibra y además almacenarse de tal forma que no reciba esfuerzos de tensión, ya que la combinación de daños superficiales por manejo, crecimiento de grietas por calentamiento y esfuerzos residuales por cambios en la composición química disminuyen considerablemente la resistencia mecánica del punto de unión de las fibras.

Para poder elaborar todo este proceso se diseñaron las máquinas empalmadoras, las cuales aplican calor en el punto de unión de las fibras para la fusión entre estas, con estos se tiene una unión permanente y no requiere de materiales adicionales como pegamentos.

Para poder lograr una unión con pérdidas aceptables, la máquina para empalmar debe monitorear varios parámetros como son:

- Posición, en el cual se utilizan posicionadores de presión
- Calor, en el cual se regula el calor aplicado al punto de unión considerando dos parámetros; el tiempo de aplicación de la fuente de calor y la intensidad de la fuente.

El primer método resulta tener grandes pérdidas ya que el mismo quemador de gas generaba impurezas en la unión de las fibras. El último método es aún muy costoso, por lo que el método de fusión por arco eléctrico es el más utilizado, en el se controla la corriente aplicada a los electrodos.

Con el desarrollo de estos equipos se han facilitado los procesos para elaborar el empalme, automatizándose cada vez más el funcionamiento, el poder estimar las pérdidas del empalme, el tener un equipo ligero, manejable y compatible con toda clase de fibras, sobre todo con pérdidas cada vez menores.

En la evolución de los empalmes por fusión se han establecido generaciones; así la primera generación la constituye el sistema totalmente manual en donde el operador alinea las fibras observando éstas a través de un microscopio, para la medición de las pérdidas en el emplame se tiene el equipo de medición en un extremo del enlace, el cual puede estar a varios kilómetros de distancia.

La segunda generación agrega un sistema de inyección y detección de luz, éste se basa en el comportamiento óptico de la fibra al curvarse. En la fibra, al sufrir un doblez, varía el ángulo de incidencia de la luz sobre el revestimiento dando como resultado que parte de la luz pueda entrar o salir al exterior de la fibra.

Una tercera generación surgió con el sistema de alineamiento de perfiles de índice de refracción PAS (Profile Alignment System). El sistema reemplaza el microscopio por una cámara de video donde se obtiene una señal de posición de los núcleos de las fibras, esta señal se utiliza para alinear automáticamente las fibras. De esta forma la alineación puede efectuarse a diferencia de la generación anterior, sin doblar ni comprimir la fibra.

Al efectuar un empalme por fusión sobre un cable de fibras ópticas, se deben proteger las uniones de las fibras del ambiente externo y al mismo tiempo tener acceso para efectuar algún mantenimiento sobre los empalmes cuando sea necesario, para satisfacer esta necesidad se utilizan las cajas de empalme, diseñadas para ser instaladas en postes, en pozos, en interiores o enterradas directamente en el suelo, por lo que deberán ser altamente resistentes a la humedad, a la corrosión, a esfuerzos mecánicos y a temperaturas extremas. Según su estructura existen dos tipos de cajas de empalmes: cilíndrica y rectangular.

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

La caja de empalme cilíndrica consta de dos bases o tapas circulares unidas mediante dos postes o barras, con charolas organizadoras para el acomodo de las fibras, los accesorios para fijar el cables y una funda plástica o cubierta moldeada en forma cilíndrica para cubrir todo el arreglo, mostrado en la figura 5.27.

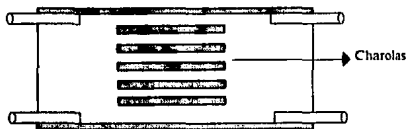


Figura 5.27 Cajas de empalmes

Las desventajas es que una vez cerrada la tapa, si se requiere reabrir por mantenimiento o expansión se deben destruir elementos de la cubierta exterior; su dificultad para preparar y cerrar la caja herméticamente.

Las cajas de empalme rectangular consisten de una estructura de acero inoxidable resistente a ácidos, con organizadores en forma de charolas de acero inoxidable o bien de cartuchos de plástico con herrajes y cojinetes.

Las cajas de tipo rectangular, ofrecen las siguientes ventajas:

- Facilidad de abrir, cerrar y montar
- Una vez cerrada la caja, puede reabrirse para mantenimiento sin necesidad de destruir ningún elemento
- de la caja, ni agregar elementos.
- No requiere de herramienta altamente especializada.
- Ofrece una gran protección al cable y a los empalmes.
- Es resistente a la corrosión, la humedad, a impactos, al fuego y al agua.
- La experiencia en el campo indica que si un empalme está hecho adecuadamente y debidamente protegido a la degradación ambiental, sus características físicas y ópticas no cambiarán. Así, el tiempo de vida del empalme no será un problema significativo bajo condiciones normales.

5.5 TIPOS DE CABLES OPTICOS

En la práctica para poder utilizar la fibra, es necesario que esté protegida contra esfuerzos mecánicos, humedad y otros factores que afectan el desempeño de la fibra. Por ello es necesario proporcionar una estructura protectora a la fibra formándose así el cable óptico.

Un cable de fibras ópticas o cable óptico puede contener una sola o muchas fibras. El cable óptico debe asegurar un medio ambiente adecuado para las fibras y facilitar su manejo. La estructura variará dependiendo si éste va a ser instalado, ya sea en ductos subterráneos, enterrado directamente, en postes, sumergido en agua, etc.

5.5.1 Parámetros característicos en un cable óptico

Los parámetros más importantes que deben ser tomados en cuenta para escoger la estructura y los elementos que forman un cable para una aplicación especial son:

- Esfuerzo máximo permitido en la fibra durante su fabricación, instalación y servicio. Este esfuerzo determina la fuerza mínima de ruptura de la fibra y la fuerza requerida para el miembro de tensión.
- Fuerza lateral dinámica y estática máxima ejercida sobre la fibra, en la cual se determina la configuración del cable y el límite de tolerancia de microcurvaturas.
- Flexibilidad. Para lograr una buena flexibilidad se colocan las fibras en forma helicoidal.
- Rango de temperatura y medio ambiente en donde el cable va a operar.

Existen algunos factores que deben ser considerados en la construcción del cable óptico como son los tipos de fuerzas a los que el cable será expuesto durante la manufactura, instalación y operación. Algunos fenómenos que resultan de estos son: microcurvaturas, torceduras y tensión, los cuales pueden perjudicar a las propiedades mecánicas o de transmisión.

La microcurvatura en una fibra óptica es causada por fuerzas laterales localizadas a lo largo de la fibra, esto se debe principalmente a los esfuerzos provocados durante la manufacturación e instalación. La sensibilidad a la microcurvatura es función de la diferencia del índice de refracción, así como también de los diámetros del núcleo y del revestimiento. Por otro lado, el cableado no debe producir aumento de la atenuación en las fibras causada por las microcurvaturas. Tomando en consideración estos parámetros, se diseña la construcción del cable el cual puede contener algunos de los siguientes componentes:

- a) Revestimiento primario
- b) Revestimiento secundario
- c) Miembro de tensión
- d) Barrera contra la humedad
- e) Armadura
- f) Cubiertas del cable

- a) **Revestimiento primario.** Tiene como función darle protección mecánica a la fibra, evitar penetración de la humedad, daños superficiales y proporcionar dimensiones maniobrables.
- b) **Revestimiento secundario.** Proporciona una protección radial contra esfuerzos mecánicos que pueden ser de dos tipos: de tubo apretado (tight), o de tubo holgado (loose).

Revestimiento de tubo apretado. Es un recubrimiento grueso aplicado sobre la cubierta primaria. Los materiales que se utilizan pueden ser polietileno, nylon, poliéster o polipropileno. Para proporcionar una protección adecuada, se debe tener un protección adecuada. Las pérdidas originadas están por debajo de 0.1 dB/Km. Ver figura 5.28.

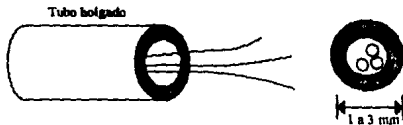


Figura 5.28 Tubo holgado

Revestimiento de tipo holgado. En este tipo de estructura las fibras se colocan en tubos termoplásticos con una cantidad de holgura tal que permita a la fibra una libertad de movimiento, dando como resultado que la fibra queda aislada de los esfuerzos de tensión a los que somete durante la instalación del cable, así como de contracciones térmicas que ocasionan microcurvaturas, como se observa en la figura 5.29.

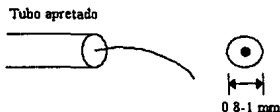


Figura 5.29 Tubo apretado

- c) **Miembros de tensión.** Estos incrementan la carga permitida en un cable. Para que el cable posea una alta resistencia mecánica su miembro de tensión debe tener un módulo de elasticidad alto, un límite elástico alto, buena flexibilidad y bajo peso por unidad de longitud. Los principales materiales utilizados como miembros de tensión son: acero, filamento plástico, fibras sintéticas, fibras de vidrio, plástico reforzado con fibras.
- d) **Barrera contra la humedad.** Para proteger la fibra óptica contra la humedad, se utilizan diferentes elementos en el cable. Uno de ellos es la jalea de petrolato, el cual además de ser repelente al agua, debe ser transparente, no tóxico y presentar una viscosidad alta para que no escurra. Otro método es usar cintas metálicas recubiertas con polietileno a manera de pantalla longitudinal, las cuales van unidas cuidadosamente, permitiendo un sello hermético. Ver figura 5.30.

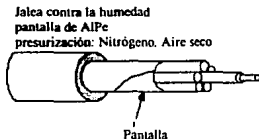


Figura 5.30 Barrera contra la humedad

- e) **Cubiertas del cable.** Las cubiertas sirven para proporcionar al núcleo del cable protección mecánica, térmica y química. Existe una gran variedad de cubiertas que se seleccionan en función de las influencias que actúan sobre el cable. Estos materiales deben tener una expansión térmica similar a los componentes adyacentes al cable, de tal forma que no se transmita esfuerzo mecánico a la fibra. En la figura 5.31 se muestra la cubierta del cable.

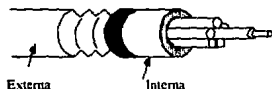


Figura 5.31 Cubierta del cable

f) **Armadura.** Cuando el cable está sujeto a un gran riesgo de daños mecánicos o para protegerlo de roedores y termitas se recomienda agregarle una armadura externa. Las armaduras para cable óptico pueden ser de dos tipos: de flejes o de alambre.

5.5.2 Estructuras de cable

Como resultado de la anterior existen una multitud de tipos y estructuras de cables ópticos:

Conjunto de fibras

Es un cable compuesto por un gran número de fibras yuxtapuestas y encerradas en una cubierta protectora, por lo que es la más simple de los cables. Hay dos tipos de haces de fibras; el primero se componen de un gran número de fibras (200 a 400) tienen una gran atenuación (400 a 1,000 dB/Km) y una gran apertura numérica (0.5 a 0.6). La ventaja de un haz como éste es el tamaño de la superficie efectiva que facilita el acoplamiento con emisores de gran superficie emisiva. El segundo tipo de haz está constituido por 6 a 40 fibras más eficientes (atenuación aproximada de 20 dB/Km y con una apertura numérica alrededor de 0.2). Un haz como éste tiene un diámetro exterior de unos cuantos milímetros, lo que facilita el acoplamiento entre el emisor y la fibra.

Estructura típicas

Este tipo presentan un elemento de refuerzo, central o periférico. Las fibras tienen un revestimiento apretado u holgado, todo ello recubierto por un revestimiento protector, como se observa en la figura. 5.32.

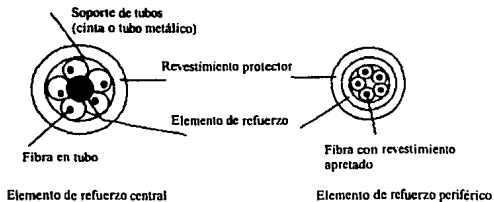


Figura 5.32 Elementos de refuerzos

Las fibras con revestimiento apretado u holgado generalmente están cableadas en forma de hélice para que estén repartidas las tensiones en las curvaturas del cable. El número de fibras varía de 1 a más de 20.

Estructuras de cinta

En ésta estructura se tienen cintas que están contra-pegadas sobre 12 fibras, agrupadas y retorcidas en grupos de 12, se tienen así 144 fibras en una sola estructura. En las estructuras de cintas, las fibras pueden tener revestimiento apretado o revestimiento holgado. La ventaja principal de una estructura como ésta, es el gran número de fibras que se pueden agrupar. Como se observa en la figura 5.33.

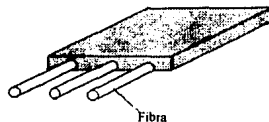


Figura 5.33 Cable con estructura de cinta

Estructuras cilíndricas ranuradas

Esta estructura permite utilizar fibras provistas sólo de su revestimiento primario; después se depositan, libres y sin tensión, en las ranuras helicoidales de un soporte central. La ventaja de ésta es que minimiza la tensión sobre las fibras y por ende, el riesgo de ruptura y de atenuación por microcurvaturas. Los cables ópticos se dividen por su uso en 3 grandes grupos:

- Cables para interiores
- Cables para exteriores
- Cables especiales

Los cables para interiores son los que se usan dentro de los edificios, estos cables en general deben tener buena flexibilidad y ser no propagadores de la flama. Estos cables pueden contener elementos metálicos o bien ser totalmente dieléctricos y pueden contener una o más fibras, si contienen una fibra monomodo por lo regular su construcción es la siguiente: la fibra lleva protección secundaria de tubo apretado, alrededor de ella lleva un miembro de tensión externo de Aramida, sobre esta lleva una cinta mylar como barrera térmica y sobre ésta la cubierta externa de PVC antifuego. Cuando lleva dos fibras su construcción es la de dos cables monofibras unidas por medio de una lengüeta en la cubierta externa.

Los cables para exteriores se emplean en la llamada planta externa, aquí existen una gran variedad de diseños caracterizándose todos ellos en contener siempre más de dos fibras.

Estos diseños contemplan todas las variables posibles:

- a) Pueden llevar revestimiento secundario de tubo holgado o de tubo apretado, o bien ir sin esta cubierta
- b) Pueden ser de elemento central de tensión de núcleo ranurado o de elemento de tensión exterior
- c) Puede llevar o no armadura y si la llevan pueden ser en cualquiera de sus variedades
- d) Por lo regular todos llevan barreras contra la humedad como; jalea de petrolato, de cintas metálicas o utilizando presión de gas.

6. TRANSMISORES Y DETECTORES

En un sistema de comunicación 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, la luz se emite en forma de pulsos de corta duración, durante el estado "alto" del pulso, se inyecta la luz a la fibra; mientras que en el estado "bajo" no se inyecta luz a la fibra. La información codificada puede ser transmitida de esta manera. Cualquiera que sea la forma de transmisión, se necesita una fuente luminosa. Estas fuentes son normalmente consideradas como parte de los componentes activos en un sistema de fibra óptica. La función de estas fuentes luminosas, es la de convertir la energía eléctrica en una forma de corriente dentro de la energía óptica (luz) de una manera eficiente que permita que la luz sea inyectada o acoplada efectivamente dentro de la fibra óptica.

La fibra tiene ciertas características. La luz debe inyectarse por la superficie de entrada que es extremadamente pequeña. Además, sólo la luz contenida en el cono de aceptación se propaga efectivamente en la fibra. La dispersión cromática en una fibra óptica es directamente proporcional al ancho de banda espectral de la fuente de luz y se puede minimizar utilizando una fuente de luz de pequeño ancho de banda espectral. Todas las características de las fibras ópticas tienen influencia directa en la elección de la fuente de luz; esta fuente debe:

- Tener una superficie pequeña de emisión y si es posible, inferior al área transversal de la fibra.
- Emitir la luz en direcciones compatibles con el cono de aceptación de la fibra.

Además, estas dos condiciones son necesarias para poder inyectar la mayor cantidad de luz de la fuente en la fibra:

- Emitir en longitudes de onda que permitan recuperar la mayor cantidad de luz al final de la fibra.
- Tener un pequeño ancho de banda para minimizar la dispersión cromática.

TRANSMISORES Y DETECTORES

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

- Tener intensidad
- Tener un tiempo rápido de respuesta
- Poder modularse con facilidad
- Ser pequeña
- Ser económica

Existen dos principales tipos de fuentes de luz: las incandescentes y las luminiscentes.

- Las incandescentes. Todo cuerpo que se calienta y que emite energía en forma de radiación. Es a lo que se le llama emisión de cuerpo negro o incandescencia. Las fuentes incandescentes emiten un espectro continuo de longitudes de onda con una banda ancha. Esta fuente térmica no cuenta con una superficie emisora pequeña en relación a la superficie de entrada de la fibra. No tiene una longitud de onda espectral pequeña para minimizar la dispersión cromática. No tiene un tiempo rápido de respuesta. Y, no puede modularse con facilidad.
- Las luminiscentes. Entre éstas, las más interesantes son las que utilizan la electroluminiscencia de los semiconductores. Para este propósito, los más utilizados son el diodo emisor de luz (LED) y el diodo láser de inyección (ILD). Actualmente estas dos fuentes cumplen con la mayoría de los criterios enunciados.

La elección entre una fuente LED o ILD se hace en función a los criterios de diseño del sistema de comunicación. Anteriormente, en la comunicaciones por fibra óptica, la fuente más poderosa de banda estrecha de luz coherente fue necesaria debido a la gran atenuación y dispersión en las fibras. Por lo tanto, los láser de gas helio-neón fueron utilizados inicialmente. Sin embargo, el desarrollo de los semiconductores ILD y LED junto con la mejora substancial en las propiedades de las fibras ópticas, han dado esperanza a estas dos fuentes en específico. Para hacer una comparación entre estos dos tipos de fuente de luz, el aspecto histórico debe ser tomado en cuenta. La primera generación de las fuentes ópticas para las comunicaciones fueron diseñadas para trabajar entre los 0.8 y los 0.9 μm (idealmente alrededor de los 0.85 μm) porque inicialmente las propiedades de los materiales semiconductores usados se prestaron para trabajar con estas longitudes de onda y de esta manera evitar la pérdida incurrida en muchas fibras que operan cerca de los 0.9 μm debido al ion OH (ion de hidróxido).

Los primeros sistemas utilizaron anteriormente el índice escalonado multimodo el cual requiere del funcionamiento óptimo del láser para enlaces con un ancho de banda razonable (decenas de megahertz) y una distancia considerable (varios kilómetros).

El LED, siendo una fuente de baja potencia, no fue apropiado para las transmisiones de larga distancia, aunque se encontró su utilidad en aplicaciones más moderadas. Sin embargo, el papel del LED como fuente para la comunicaciones por fibra óptica fue mejor después del desarrollo de la fibra de índice graduado multimodo. La reducción substancial en la dispersión intermodal dada en la fibra multimodo de índice escalonado, permitió a los LEDs no coherentes operar en la banda de longitudes de onda de 0.8 y 0.9 μm y ser utilizados en aplicaciones que requieren anchos de banda más grandes. Esta posición, fue consolidada posteriormente con el desarrollo de la segunda generación de fuentes de fibra óptica operando a longitudes de onda entre 1.1 y 1.6 μm , donde la pérdida debida a los materiales empleados ha sido considerablemente reducida. En esta región de longitud de onda, los sistemas de fibra de índice graduado de banda ancha que utilizan LED como fuente, pueden ser operados en sistemas de comunicación para largas distancias. Además, los LED ofrecen la ventaja de una construcción y operación más sencilla con el efecto inherente del costo y larga duración.

En paralelo, con el desarrollo de la propagación óptica multimodo, vinieron avances en la construcción de fibras monomodo. Esto ha estimulado el desarrollo de las fuentes láser monomodo para tomar ventaja de la baja dispersión de las fibras monomodo. Estos sistemas son idealmente utilizados para anchos de banda grandes y para aplicaciones de larga distancia. Sin embargo, el LED ha sido utilizado primeramente como una fuente multimodo dando una eficiencia de acoplamiento aceptable dentro de estas fibras. Aunque en la actualidad el LED es escogido para muchas aplicaciones que utilizan fibras multimodo y el ILD tiende a encontrar más su uso como dispositivo monomodo en un sistema de fibra monomodo.

6.1 DIODO EMISOR DE LUZ (LED)

Las fuentes de luz más comunes de fibra óptica son los LEDs, que operan en el infrarrojo cercano del espectro electromagnético. La idea principal de LED, es mostrada en la figura 6.1. Un pequeño voltaje es aplicado a través de un diodo semiconductor, originando un flujo de corriente a través de la unión. El diodo está constituido por dos regiones, cada una contaminada con impurezas.

TRANSMISORES Y DETECTORES

La región *p*, es la que menos electrones tiene en el compuesto del semiconductor, lo cual crea huecos donde hay espacios para electrones en la red cristalina. La región *n*, es contaminada con impurezas que donen electrones, así los electrones restantes quedan libres en la red cristalina. Aplicando un voltaje positivo a la región *p* y un voltaje negativo a la región *n*, ocasiona que los electrones y huecos fluyan hacia la unión de las dos regiones, donde serán recombinados. Los electrones se mantendrán fluyendo a través del diodo y la recombinación continuará en la unión gracias a la aplicación de este voltaje.

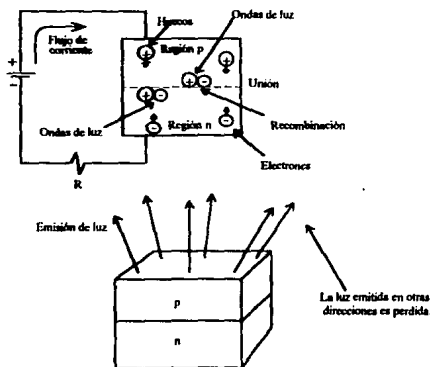


Figura 6.1 Operación del LED

6.1.1 Emisión Espontánea

Considérese un semiconductor puro (intrínseco) que tiene una banda prohibida E_g suficientemente grande para que a 25 °C la energía térmica no pueda enviar los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. A esta temperatura el semiconductor es un aislante, es decir, la banda de valencia está llena y la banda de conducción está vacía; el semiconductor se encuentra entonces en estado de equilibrio a 25 °C, véase la figura 6.2.

Si un electrón de la banda de valencia se estimula con un fotón de energía superior o igual a banda prohibida (E_g), éste subirá a la banda de conducción y dejará un hueco en la banda de valencia. Se creará entonces, un par electrón-hueco. El semiconductor ya no se encuentra en estado de equilibrio sino en un estado de excitación. A este proceso se le conoce con el nombre de absorción. Por el contrario, el semiconductor que se encuentra en un estado de excitación tenderá a volver a su estado de equilibrio. El regreso al estado de equilibrio se hará por un mecanismo llamado recombinación, gracias al cual el electrón que encuentra un hueco vuelve a descender a la banda de valencia. En el transcurso de esta recombinación, un fotón es emitido mediante el mecanismo de emisión espontánea puesto que el electrón pasa de un nivel de energía alto a uno bajo. La energía que es liberada en forma de luz es igual a la de la banda prohibida (E_g), se dice entonces que la recombinación es radiante. La recombinación puede ser también no radiante, es decir, que se hace sin emisión de fotones, en cuyo caso, la energía en la banda prohibida se libera en forma de calor. Para la fabricación de fuentes de luz, es adecuado utilizar un material semiconductor en el cual sea más probable que ocurra el proceso de recombinación radiante que el de recombinación no radiante.

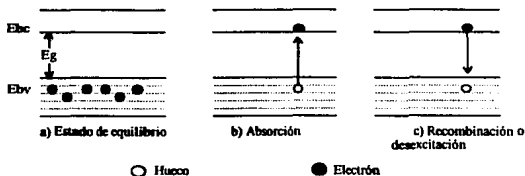


Figura 6.2 Emisión espontánea de un fotón en un semiconductor. E_g es la banda prohibida, E_{bv} es la energía de la parte superior de la banda de valencia y E_{bc} es la energía de la banda de conducción

Para saber por qué el proceso de recombinación puede tener más probabilidad de ser radiante, el tiempo de vida del electrón es utilizado como parámetro para los dos procesos de recombinación. Este tiempo de vida es la duración media que permanece un electrón en la banda de conducción antes de encontrar un hueco y recombinarse. Llámese T_r al tiempo de vida del electrón que da una recombinación radiante y T_{nr} al tiempo de vida que origina una recombinación no radiante.

TRANSMISORES Y DETECTORES

Si en un semiconductor se da $T_r < T_{nr}$, los electrones se recombinan muy rápido en forma radiante y pocos electrones lo hacen en forma no radiante; en este caso se generan muchos fotones. En el caso contrario, cuando $T_r > T_{nr}$ las recombinaciones no radiantes ocurren más rápido que las radiantes y casi toda la energía se libera en forma de calor. El tiempo de vida T_r depende principalmente de la estructura de la banda prohibida del semiconductor. Existen dos estructuras de la banda prohibida como se muestra en la figura 6.3. En el primer caso, los electrones de la parte superior de la banda de valencia poseen vectores de onda k idénticos a los de los electrones de la parte inferior de la banda de conducción. Estos electrones tienen en consecuencia la misma cantidad de movimiento mv , dada por la ecuación 6.1.

$$mv = \frac{hk}{2\pi} \quad (6.1)$$

donde:

v = Velocidad del electrón

m = Masa

h = Constante de Plancks (6.63×10^{-34} J s)

El segundo caso se tiene cuando los electrones de la parte superior de la banda de valencia no tienen el mismo vector de onda k que los de la parte inferior de la banda de conducción. En el primer caso, se habla de un semiconductor de transición directa en el segundo caso se tiene un semiconductor de transición indirecta.

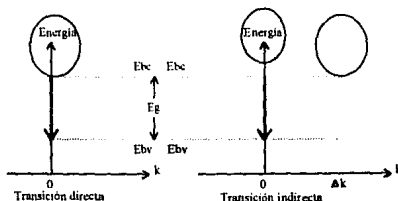


Figura 6.3 Diagrama de bandas para un semiconductor de transición directa y uno de transición indirecta

Ya sea que se tenga una transición electrónica entre la parte inferior de la banda de conducción y la parte superior de la banda de valencia (recombinación), o lo contrario (absorción), debe haber conservación de la energía y de la cantidad de movimiento (o del vector de onda k) al mismo tiempo. En un semiconductor de transición directa, como los electrones tienen el mismo valor de onda k , la transición electrónica debe respetar únicamente el principio de la conservación de la energía, es decir, que la energía total después de la transición debe ser igual a la energía total antes de la transición. Ahora bien, de acuerdo al principio de conservación de la energía se tiene la ecuación 6.2:

$$E_{bc} = E_{bv} - E_g \quad (6.2)$$

donde:

E_{bc} = Energía del electrón antes de la transición.

E_{bv} = Energía del electrón después de la transición.

E_g = Energía del fotón.

En un semiconductor de transición indirecta, además de la conservación de la energía se debe conservar la cantidad de movimiento. Como el fotón tiene una cantidad de movimiento muy pequeña, la transición electrónica necesita de la ayuda de las vibraciones térmicas de los átomos (fonones) de la red cristalina para que se respete el principio de la conservación de la cantidad de movimiento.

Antes de la transición : Energía del electrón E_{bc} ;
vector de onda del electrón Δk .

Después de la transición: Energía del electrón E_{bv} ;
Energía del fotón E_g ;
Energía del fonón ≈ 0 (vibraciones térmicas del átomo);
Vector de onda del electrón $= 0$;
Vector de onda del fonón Δk .

Se tiene conservación de la energía porque $E_{bc} = E_{bv} - E_g$. Y se tiene también conservación de la cantidad de movimiento puesto que el fonón absorbió al vector de onda Δk del electrón.

La interacción de las vibraciones de una red cristalina es un fenómeno lento lo que implica que T_r es mucho mayor en los semiconductores de transición indirecta de banda. Los materiales semiconductores de transición directa de banda son por lo tanto, la única elección posible.

Se define un parámetro η_i , llamado eficiencia cuántica interna, que da la relación entre el número de fotones producidos respecto al número de electrones que se recombinan. Si todos los electrones que se recombinan con los huecos lo hacen en forma radiante, la eficiencia cuántica interna es igual a 1 o 100%. Esta eficiencia cuántica depende directamente del tiempo de vida T_r y T_{nr} dada por la fórmula 6.3.

$$\eta_i = \frac{T_{nr}}{T_r + T_{nr}} \tag{6.3}$$

6.1.1.1 Electroluminiscencia

En la unión de un semiconductor contaminado de tipo n y otro contaminado de tipo p , existe una zona desértica de portadores, llamada zona de transición. En ausencia de polarización, se crea un campo eléctrico en esta zona que no permite que los electrones mayoritarios de la región n pasen a la región p , ni que los huecos mayoritarios pasen de la región p a la región n , véase figura 6.4.

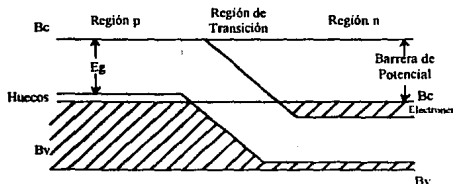


Figura 6.4 Unión $p-n$ en equilibrio térmico sin polarización

Hay una diferencia de potencial asociada al campo eléctrico que se llama barrera de potencial, que no permite el desplazamiento de las cargas. Si se polariza esta unión en directa, es decir, haciendo positiva la región p en relación con la región n , se reduce la intensidad del campo y disminuye la barrera de potencial, véase figura 6.5.

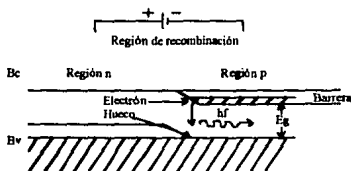


Figura 6.5 Unión p - n con una tensión de polarización directa

Los electrones pueden entrar a la región p y los huecos a la región n donde se recombinan con electrones y huecos. Si el semiconductor elegido es de transición directa de banda y de buena calidad cristalina, las recombinaciones serán principalmente radiantes y si la eficiencia cuántica es igual a uno, cada electrón que se combina origina un fotón cuya energía hf es cercana a la de la banda prohibida E_g . Ver ecuación 6.4.

$$hf = \frac{hc}{\lambda} \approx E_g \quad (6.4)$$

Los portadores que se recombinan son suministrados por la fuente de polarización y constituyen la corriente directa del diodo. El voltaje V que se debe aplicar es cercano al de la barrera de potencial. Puesto que el potencial es la energía por unidad de carga, V está dado aquí por la ecuación 6.5.

$$V \approx \frac{E_g}{e} \quad (6.5)$$

donde:

E_g = Energía de la banda prohibida en joules.

e = Carga del electrón (1.6×10^{-19} Coulombs).

Si E_g , se expresa en electrón-volts (eV), se tiene entonces la ecuación 6.6.

$$V \approx E_g \quad (6.6)$$

6.1.2 Características de los LED

6.1.2.1 Potencia óptica de salida

La potencia ideal de salida de la luz contra las características de corriente para un LED son mostradas en la figura 6.6. Intrínsecamente el LED es un dispositivo lineal en comparación con los diodos láser de inyección (ILD) y por consiguiente, tiende a ser más apropiado para transmisiones analógicas donde fuertes restricciones son puestas en la linealidad de la fuente óptica.

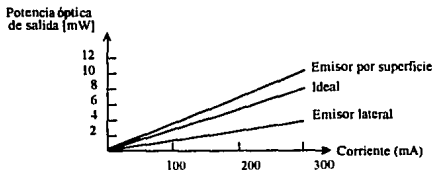


Figura 6.6 Potencia de salida contra la corriente para un LED

De una manera similar a los ILD, la eficiencia cuántica interna de los LED decrece exponencialmente con el incremento de la temperatura. Por consiguiente, la emisión de la luz de estos dispositivos decrece conforme la temperatura de la unión $p-n$ aumenta.

6.1.2.2 Espectro óptico

El ancho de banda espectral de un LED operando a la temperatura ambiente y a longitudes de onda entre los 8 y los 9 μm es normalmente de 25 a 40 nm para la mitad de su intensidad máxima. Para materiales con banda prohibida de menor energía operando a longitudes de onda entre los 1.1 y 1.7 μm el ancho de banda espectral tiende a incrementarse entre los 50 y los 160 nm. Ejemplos de estos tipos de ancho de banda espectral son mostrados en la figura 6.7 (a). También, se muestran en la figura 6.7 (b) los incrementos en el ancho de banda espectral debido al incremento de los niveles de impureza en los materiales. Esto, llega a ser la diferencia en el espectro de salida entre los diodos emisores por superficie y lateral donde las capas activas de los dispositivos están fuerte y debilmente contaminadas (o sin impurezas) respectivamente. También, el corrimiento y reducción en la emisión de la longitud de onda (más energía) por la reducción de impurezas puede verse en la figura 6.7 (b), y por consiguiente la composición de las capas activas debe ser ajustada si es que el mismo centro de longitud de onda quiere ser mantenido.

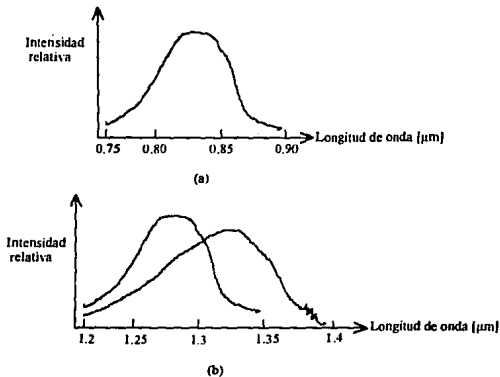


Figura 6.7 Espectro de salida del LED; (a) espectro de salida de un diodo emisor por superficie AlGaAs con la región activa contaminada; (b) espectro de salida de un diodo emisor por superficie InGaAsP

6.1.2.3 Ancho de banda

El ancho de banda en las comunicaciones ópticas, puede ser definido ya sea en términos eléctricos u ópticos. Sin embargo, cuando los circuitos eléctricos asociados son considerados en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, la definición eléctrica es normalmente usada cuando la potencia eléctrica de la señal ha caído a la mitad de su valor máximo debido a la modulación de la señal óptica.

Esto corresponde al punto eléctrico de -3dB o a la frecuencia a la cual la potencia eléctrica de salida es reducida en 3dB con respecto a la potencia eléctrica de entrada. Por lo tanto, el ancho de banda eléctrico estará dado por el rango de frecuencias entre 0 y el punto de -3dB. La comparación entre estos dos anchos de banda se muestra en la figura 6.8, donde puede ser visto que el ancho de banda óptico es significativamente más grande que el ancho de banda eléctrico. La diferencia entre ellos (en términos de frecuencia) depende del perfil de la respuesta en frecuencia del sistema. Sin embargo, si se asume que la respuesta del sistema es Gaussiana entonces, el ancho de banda óptico es de un factor de $\sqrt{2}$ más grande que el ancho de banda eléctrico.

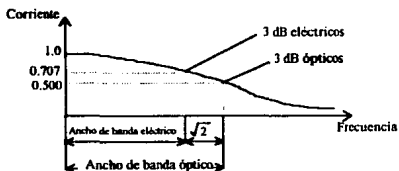


Figura 6.8 La respuesta en frecuencia para un sistema de fibra óptica mostrando los anchos de banda eléctrico y óptico

El ancho de banda de los LED es generalmente determinado por tres mecanismos. Estos son:

- a) El nivel de impureza en la capa activa.
- b) La reducción del tiempo de vida radiante por la inyección de portadores.
- c) La capacitancia parásita del dispositivo.

6.1.2.4 Confiabilidad

Los LED generalmente no son afectados por los mecanismos de degradación que pueden afectar severamente a los ILD. Sin embargo pequeñas fallas de fabricación pueden ocurrir aleatoriamente. Dichas fallas pueden ser normalmente removidas del LED durante el período inicial de quemado del circuito. Además, los LED presentan degradación gradual la cual puede convertirse en un modo de degradación rápida (pasa el periodo de quemado pero falla en la operación temprana del dispositivo) o en un modo de degradación lenta.

6.1.3 Tipos de LEDs

6.1.3.1 Diodo emisor por superficie

Un LED debe tener una superficie emisora igual o inferior a la del núcleo de la fibra, para tener un acoplamiento óptico con la fibra. Es necesario entonces, limitar la parte emisora a una superficie pequeña. Además, la luz emitida debe ser lo más compatible posible con el cono de aceptación de la fibra. También, el LED debe emitir un flujo energético lo más elevado posible.

La reducción de la superficie emisora se realiza limitando la superficie de la zona de recombinación. La circulación de la corriente eléctrica queda por tanto, limitada a una región pequeña de la unión, véase la figura 6.9.

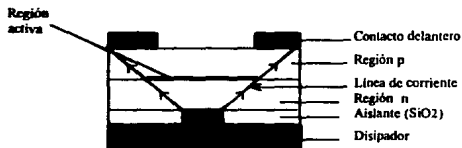


Figura 6.9 Reducción de la superficie de la región activa por limitación del contacto posterior mediante SiO₂

La potencia óptica emitida por un LED crece cuando la corriente aumenta. Si se toma en cuenta el bajo rendimiento de un LED, una parte de la potencia eléctrica que se le suministra se transforma en calor. Para poder aumentar la corriente, se supone que el calor puede ser disipado.

TRANSMISORES Y DETECTORES

Como éste proviene principalmente de la región vecina de la unión, es necesario que exista buena conducción térmica entre la unión y algún disipador térmico por lo que, la unión debe estar lo más cerca posible al disipador. Para cumplir con esta condición, se invierte el LED, es decir, la unión se coloca cerca del contacto posterior del disipador, véase la figura 6.10 (a).

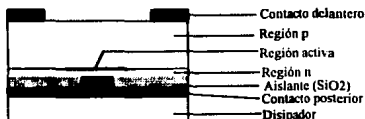


Figura 6.10 (a) LED de estructura invertida. La región activa está muy cerca del contacto posterior

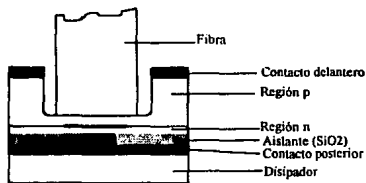


Figura 6.10 (b) LED de estructura invertida con surco en la región p a fin de acercar la fibra a la región activa

Con una estructura como ésta, los fotones se emiten muy lejos de la superficie de salida, por lo que es necesario disminuir la absorción lo más que se pueda.

Para reducir la distancia entre la zona de recombinación y la superficie de salida se utiliza el LED de estructura invertida con un surco en la región p, a fin de acercar la fibra a la región activa, véase figura 6.10 (b).

Para disminuir el coeficiente de absorción, es necesario también que los fotones no se propaguen en el mismo material de la zona de recombinación, sino en un material con banda prohibida mayor. De esta forma, los fotones no tienen la suficiente energía para ser absorbidos, véase la figura 6.11(a).

Esta condición se realiza gracias a las heterouniones. Las reducciones de la superficie, la distancia y el coeficiente de absorción, pueden realizarse para un mismo LED. En este caso se dice que se tiene un LED tipo Burrus, del nombre de su creador, véase la figura 6.11 (b).

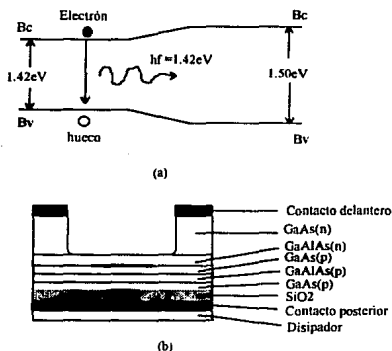


Figura 6.11 (a) Heterounión de materiales con bandas prohibidas diferentes; (b) LED de tipo "Burrus" que combina una estructura invertida, surco y heterouniones

6.1.3.2 Diodo emisor lateral

En este diodo se emplea una doble heterounión para limitar a los portadores y fotones dentro de una capa angosta. En una cara del diodo se coloca un espejo y en la otra una cubierta antirreflejante para aumentar la eficiencia de emisión, como se muestra en la figura 6.12. Su emisión es mayor que la del diodo emisor por superficie.

El haz de divergencia sale a 30° en el plano perpendicular de la unión. Sin embargo, en el plano de la unión se observa una distribución Lambertiana con la mitad de la potencia alrededor de los 120° . La mayor parte de la luz propagada es emitida únicamente por una de las caras terminales debido a la capa reflectora en la cara terminal y a la capa antirreflejante en la cara emisora. La emisión efectiva en la cara emisora puede ser muy alta, dado el incremento de la eficiencia de acoplamiento de la fibra con la superficie emisora. En la tabla IX se muestran las características de los diodos emisores de luz.

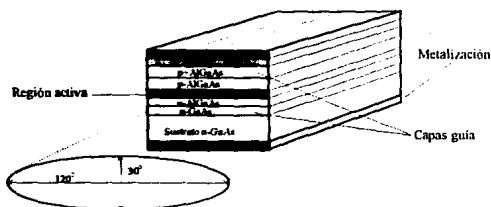


Figura 6.12 Estructura de un LED de emisión lateral

En la tabla IX se pueden observar las características de los LED, para comunicaciones ópticas.

Tabla IX

Material	GaAlAs	InGaAsP
Longitud de onda	750 - 900 nm	950 - 1650 nm
Potencia medida	1 mW	
Ancho espectral	30 - 50 nm	70 - 110 nm
Ancho de banda típico	10 - 100 Mhz	
Potencia acoplada a la fibra	0.02 - 0.01 mW	
Aplicaciones con fibra	multimodo	
Temperatura de operación	0 - 60 °C	
Fiabilidad (tiempo de vida)	$10^6 - 10^7$ Horas	

6.2 DIODO LASER DE INYECCION (ILD)

Los láser semiconductores son parecidos a otros tipos de láser; son emisores de luz coherente, es decir, monocromática (longitud espectral muy pequeña) y muy directa. Las transiciones electrónicas correspondientes son transiciones entre las bandas de un semiconductor. En los láser 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. Hay por lo tanto amplificación por emisión estimulada de luz.

6.2.1 Emisión Estimulada

Considerense dos niveles de energía E_1 y E_2 de un átomo, véase la figura 6.13(a).

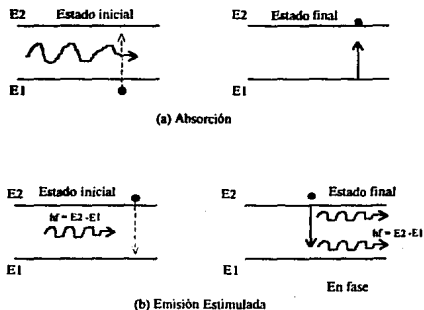


Figura 6.13 (a) Excitación de un átomo por absorción de un fotón de energía $hf = E_2 - E_1$; (b) Emisión estimulada de un fotón de energía $hf = E_2 - E_1$ provocada por un fotón de energía $hf = E_2 - E_1$. El átomo excitado inicialmente. Los dos fotones emitidos están en fase.

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

Si un fotón de energía $E_2 - E_1$, llega mientras el átomo está excitado, véase la figura 6.13(b), provoca instantáneamente el regreso del electrón al nivel y la emisión de un nuevo fotón. El fotón emitido se encuentra en fase con el fotón que provocó la transición. Es el fenómeno de emisión estimulada. Entonces se dice, que hay amplificación de luz puesto que a partir de un fotón se obtienen dos. Este es el efecto láser.

En un semiconductor las transiciones ocurren entre dos bandas. El nivel base corresponde a la banda de valencia (normalmente llena), el nivel excitado, a la banda de conducción (normalmente vacía). Como se había visto en el caso de los LED, las transiciones en los semiconductores son radiantes, sobre todo en los semiconductores de transición de banda directa. Es necesario entonces, si se pretende provocar una emisión estimulada, que el semiconductor elegido sea de transición de banda directa. La emisión estimulada sólo se produce si hay más átomos en el estado excitado que en el estado base. En efecto, esta emisión ocurre simultáneamente con la absorción. La transición se realiza siempre de la banda más llena a la más vacía; si la banda de valencia está más llena que la banda de conducción, un fotón provoca absorción. En el caso contrario, éste provoca emisión estimulada. Una condición esencial en la emisión es que la banda de conducción esté más llena que la de valencia. Este no es un estado normal, en cuyo caso se dice que hay inversión de población; esta inversión de población se realiza por la operación de bombeo que consiste, para un semiconductor, en poner suficientes electrones en la banda de conducción. Este proceso se obtiene usando una fuente de energía externa. Un método común para el bombeo involucra la aplicación de una radiación intensa (ejem. un campo electromagnético de alta frecuencia). En el caso anterior, los átomos son excitados a un estado de energía superior a través de la absorción estimulada.

Para que el efecto láser pueda producirse en el semiconductor es necesario;

- Producir una inversión de población y
- Disponer de una cavidad resonante (oscilador) para que haya amplificación



Figura 6.14 Cavidad resonante Fabry-Perot

La amplificación en el láser ocurre cuando un fotón choca con un átomo del nivel excitado causando la emisión estimulada de un segundo fotón y estos dos fotones a su vez liberan dos fotones más. La continuidad de este proceso crea una multiplicación en avalancha, y cuando las ondas electromagnéticas asociadas con estos fotones se encuentran en fase se obtiene amplificación coherente. Para obtener esta acción láser, es necesario contener fotones dentro del medio láser y mantener las condiciones para la coherencia. Esto se obtiene, poniendo o formando espejos (planos o curvos) en los extremos del amplificador como se muestra en la figura 6.14. La cavidad óptica formada es más parecida a un oscilador que a un amplificador, puesto que ésta genera retroalimentación positiva cuando los fotones se reflejan en los espejos formados en los extremos de la cavidad. Por consiguiente, la señal óptica es retroalimentada muchas veces mientras se amplifica cuando pasa por el medio. La estructura por lo tanto, actúa como un resonador Fabry-Perot. Aunque la amplificación de la señal que pasa por el medio es muy pequeña, después de pasar varias veces por el mismo la ganancia es incrementa. Además, si un espejo es parcialmente transparente la luz puede escapar de la cavidad.

Una salida estable se obtiene cuando la cavidad se satura, esto ocurre cuando la ganancia óptica es igual a las pérdidas incurridas en la misma cavidad. Las mayores pérdidas resultan de factores tales como; absorción y dispersión en el medio de amplificación y absorción, dispersión y difracción en los espejos.

La resonancia ocurre en la cavidad óptica dentro de un pequeño rango de frecuencias, donde la ganancia en la cavidad es suficiente para compensar las pérdidas. Por consiguiente, el dispositivo no es una fuente perfectamente monocromática pero la luz es emitida con un ancho de banda espectral pequeño.

Las frecuencias centrales de este espectro son determinadas por la diferencia de niveles de energía de la transición de la emisión estimulada. Otras frecuencias de resonancia dentro del espectro de la banda resultan de la variación de frecuencias, debido al choque y movimiento térmico de los átomos dentro del amplificador. Por lo tanto, la amplificación dentro del medio láser resulta en una amplia transición láser o curva de ganancia con un ancho espectral finito, como se muestra en la figura 6.15.

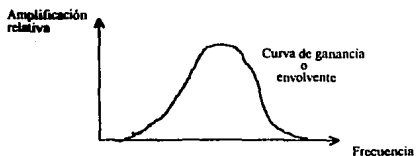


Figura 6.15 Curva de ganancia producida por la amplificación en la cavidad resonante

La emisión resultante es muy directa en este caso. Para poder subsistir en la cavidad resonante, la luz debe producir interferencia constructiva, lo que implica que la longitud de la cavidad debe ser igual a un múltiplo entero de la media de la longitud de onda de la luz. La longitud de onda de la luz es igual a λ / n en un medio de índice n . Se tiene entonces para la condición de resonancia, la relación:

$$L = m \frac{\lambda}{2n} \quad (6.7)$$

donde:

L = Longitud de la cavidad

m = Orden de los modos que pueden existir en la cavidad.

6.2.3 Diodo Láser de Homocisión

En el estudio de los LED, se observó que al polarizar en sentido directo la unión $p-n$ de un semiconductor de transición de banda directa, se presenta una recombinación radiante de los pares electrón - hueco. Se puede entonces, concebir un láser de semiconductor para el cual la inversión de población se produce por inyección de corriente en una unión $p-n$; este es el láser de inyección. La cavidad resonante es la zona de recombinación radiante. Si se cortan en capas dos de las caras opuestas del cristal, se obtienen dos espejos semitransparentes. Las otras dos caras deben ser esmeriladas con el fin de que la cavidad sea activa en una sola dirección como se puede observar en la figura 6.16.

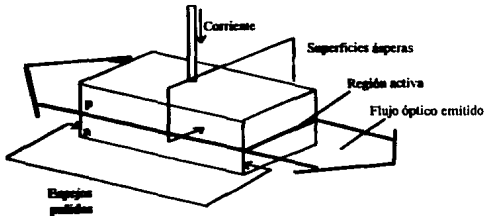


Figura 6.16 Estructura de un láser semiconductor de homocisión

Si la corriente es pequeña, hay emisión espontánea en todas direcciones, pero si la corriente aumenta, la inversión de población es suficiente y la ganancia de la cavidad es suficientemente grande para que una onda pueda atravesarla sin atenuación. Existe por tanto, un umbral de corriente por el cual se produce el efecto láser. Debe haber cierta densidad de electrones en la banda de conducción para lograr el efecto láser. La densidad de electrones depende de la corriente y el tiempo de vida de los electrones (tiempo de recombinación). La densidad de corriente necesaria para lograr el efecto láser (densidad de umbral) está ligada a la densidad de electrones. Esta densidad de corriente es muy importante para poder hacer funcionar el láser en una forma continua. Para esto, es necesario disminuir la densidad de corriente lo más que se pueda y una forma de hacerlo es modificando el espesor de la región activa (zona de combinación

radiante); si se aumenta, se alcanza una barrera de potencial al impedir que los electrones inyectados penetren mucho en la región p ; esto se conoce como confinamiento eléctrico. Con el fin de que la emisión estimulada sea más eficaz, se añade el confinamiento óptico al confinamiento eléctrico, de tal manera que la región activa se comporte como una fibra óptica, es decir, que la luz se propage sin salir salvo por las extremidades del dispositivo. El confinamiento eléctrico y óptico se realizan en lo que se llama láser de heterouniones; por analogía, al láser sin confinamiento se le denomina láser de homounión.

6.2.4 Láser de heterounión

En la sección anterior han sido consideradas las propiedades fotoemisivas de la unión $p-n$ fabricada de un material semiconductor de cristal sencillo (homounión). Sin embargo, las propiedades radiantes de la unión de un diodo pueden ser mejoradas con el uso de heterouniones. Las cuales, son colocadas entre dos semiconductores de cristal sencillo con diferentes energías en la banda prohibida. Para lograr el confinamiento eléctrico, es necesario hacerlo de modo que la banda prohibida de la zona activa sea más pequeña que la del resto del cristal. Para ello, se realizan estructuras en capas con diferentes materiales semiconductores, véase figura 6.17.

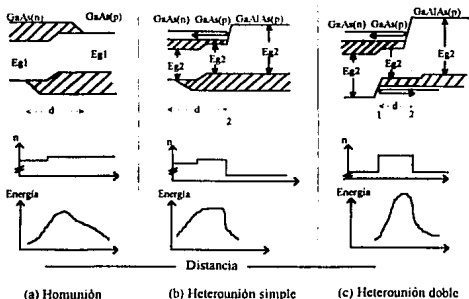


Figura 6.17 Diagramas de energía del índice de refracción y distribución de la energía radiada en función de la distancia, para un diodo láser de homounión, de heterounión simple y de heterounión doble

El láser representado en esta figura 6.17(c), está constituido por tres capas de diferente material semiconductor. En el centro se tiene una capa de GaAs que es la zona activa; esta capa está situada entre otras dos capas de GaAlAs. Como el GaAs tiene una banda prohibida más pequeña que la del GaAlAs, se producen de esta manera dos barreras de potencial. La barrera situada en el plano 2 de la figura, detiene a los electrones, mientras que la barrera situada en el plano 1 detiene a los huecos. El valor típico del espesor de la región activa es del orden de 0.5 μm .

6.2.5 Materiales semiconductores

Los materiales semiconductores utilizados para la fabricación de fuentes ópticas deben cumplir con varios criterios, éstos son los siguientes:

1. La formación de la unión *p-n*. Los materiales deben formar las uniones *p-n* con características apropiadas para la inyección de portadores.
2. Electroluminiscencia eficiente. Los dispositivos fabricados deben tener una alta probabilidad de transición radiante y por lo tanto una alta eficiencia cuántica interna. Por consiguiente los materiales empleados deben ser semiconductores de transición directa o indirecta con impurezas apropiadas.
3. Útiles longitudes de onda. Los materiales deben emitir luz en las longitudes de onda apropiadas para ser compatibles con las actuales fibras ópticas y detectores (0.8 a 1.7 μm). Idealmente, con la contaminación y fabricación apropiada, la banda prohibida se puede variar para alcanzar la longitud de onda deseada.

Las investigaciones iniciales de los materiales electroluminiscentes para el LED a principios de 1960, se concentraron en las aleaciones de los semiconductores de transición directa III - V incluyendo los componentes binarios arseniuro de galio (GaAs) y fósforo de galio (GaP) y el componente ternario fósforo de arseniuro de galio (GaAsP). El arseniuro de galio trabaja eficientemente a longitudes de onda entre los 0.88 y 0.91 μm y para la primera generación de sistemas de comunicación por fibra óptica, fue el primer material usado para la fabricación del láser semiconductor de homounión operando a bajas temperaturas. Sin embargo, inmediatamente comprendieron que mejores dispositivos podían ser fabricados con estructuras heterounión las cuales, a través de los portadores y el confinamiento eléctrico darían una mejor salida de luz.

reduciendo drásticamente la corriente del dispositivo. Para fabricar el láser de heterounión, se utiliza un sustrato en el que se hace crecer por procedimientos epitaxiales en fase líquida, a los compuestos que constituyen las diversas capas.

Algunos de los materiales más comunes, que se utilizan para la fabricación de los dispositivos de doble heterounión, junto con sus longitudes de onda se muestran en la tabla X.

Tabla X

Materiales región activa/capa limitadora	Longitudes de onda rango (μm)	Sustrato
$\text{GaAs} / \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.8 - 0.9	GaAs
$\text{GaAs} / \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$	0.9	GaAs
$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As} / \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.65 - 0.9	GaAs
$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As} / \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$	0.85 - 1.1	GaAs
$\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x / \text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$	0.9 - 1.1	GaAs
$\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x / \text{GaSb}$	1.0 - 1.7	GaSb
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y} / \text{InP}$	0.92 - 1.7	InP

6.2.6 Modos láser

El espectro típico de emisión de un láser de inyección de área ancha se muestran en la figura 6.18 (a). Este, no consiste de una sola longitud de onda de emisión sino de una serie de picos de longitudes de onda de diferentes modos longitudinales (con respecto al plano de la unión, junto con la cavidad óptica) dentro de la estructura. El espacio entre modos depende de la longitud de la cavidad óptica, por que cada uno corresponde a un número de longitudes. Estos modos se encuentran normalmente separados por algunas decenas de nanómetros y se dice entonces que el láser es un dispositivo multimodo. Sin embargo, la figura 6.18 (a), también muestra algunos ensanchamientos de los picos de modo longitudinal debido a los picos de menor intensidad causados por modos transversales de mayor orden.

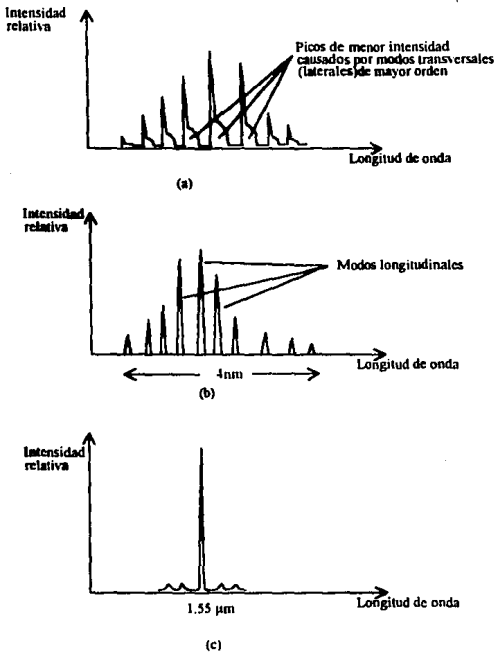


Figura 6.18 Espectro de salida de un láser multimodo de inyección. (a) dispositivo multimodo transversal; (b) dispositivo monomodo transversal con cinta; (c) espectro de salida de un solo modo transversal de un láser monomodo

Estos modos laterales de mayor orden pueden presentarse en los dispositivos de área ancha debido al ilimitado espesor de la región activa. La perfecta geometría de la cinta inhibe la aparición de modos laterales de mayor orden, limitando el ancho de la cavidad óptica y dejando

pasar solamente un monomodo lateral dando el espectro de emisión mostrado en la figura 6.18 (b), donde solamente los modos longitudinales pueden ser vistos. Esto representa el espectro típico de emisión de un láser multimodo de inyección.

Para la operación de un láser monomodo de inyección, el espectro óptico del láser debe contener un solo modo longitudinal y un solo modo transversal, como se muestra en la figura 6.18 (c). Así que, la operación monomodo puede ser obtenida controlando la longitud de la cavidad resonante de tal manera que únicamente un modo longitudinal caiga dentro del ancho de banda del dispositivo.

6.2.7 Principales características de un láser de inyección

6.2.7.1 Flujo energético P_e emitido en función de la corriente

Cuando la corriente I es inferior a la corriente de umbral I_s , el láser funciona como un LED, véase la figura 6.19. Los LED de emisión lateral son construidos según técnicas idénticas a las de los láser de inyección.

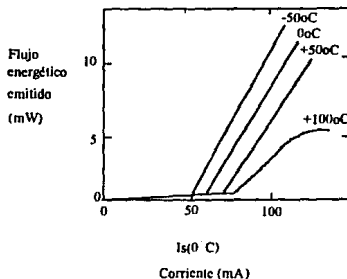


Figura 6.19 Potencia emitida en función de la corriente inyectada para cuatro temperaturas diferentes

Para una corriente I superior a la corriente de umbral I_s , el flujo energético emitido crece linealmente con la corriente. Se define un rendimiento de pendiente o eficiencia cuántica externa R como:

$$R = \frac{\Delta P_e}{\Delta I} \text{ para } I > I_s \quad (6.8)$$

donde:

R e I_s varían ambas con la temperatura.

Para mantener P_e constante, es necesario controlar la temperatura o la corriente; la medida de P_e necesaria para el control, puede utilizar la luz emitida por la cara posterior. La función de control se debe hacer de modo que ni la corriente ni la temperatura sobrepasen los valores máximos dados por el fabricante. Se puede definir un rendimiento de potencia R_p como; la relación entre el flujo energético total emitido y la potencia eléctrica inyectada en el diodo láser.

$$R_p = \frac{P_e}{V - I} \quad (6.9)$$

6.2.7.2 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación de un diodo láser depende de las dimensiones de la región emisora (espesor de la región activa y ancho de la cinta). El diagrama de radiación se define si se dan los ángulos; $\Theta_{||}$ en el plano paralelo a la cinta (plano de la unión) y Θ_{\perp} en el plano perpendicular a la cinta. $\Theta_{||}$ y Θ_{\perp} están definidos como los ángulos a media intensidad en los diagramas de radiación en los planos considerados, véase figura 6.20.

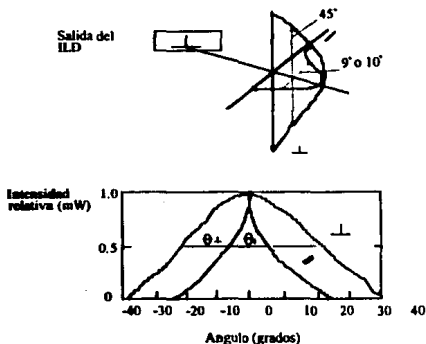


Figura 6.20 Diagrama de radiación de un diodo láser

Los valores usuales de $\Theta_{||}$ y Θ_{\perp} son 10° y 45° . El diagrama de radiación es por tanto, mucho más directivo que el de los LED que emiten por la superficie ($\Theta_{||} = \Theta_{\perp} \approx 120^{\circ}$) o los LED de emisión lateral ($\Theta_{||} \approx 100^{\circ}$, $\Theta_{\perp} \approx 60^{\circ}$).

6.2.7.3 Espectro de emisión

Todas las longitudes de onda que satisfacen la ecuación $L = m\lambda / 2n$ corresponden a modos posibles. La separación entre dos modos sucesivos esta dada por:

$$\Delta\lambda = 2nL \left(\frac{1}{m-1} - \frac{1}{m} \right) = -2nL \frac{1}{m(m-1)} \quad (6.10)$$

Los modos están por tanto, muy cercanos unos de otros. Cuando se aumenta la corriente, un solo modo aumenta en intensidad produciendo un espectro con un solo pico, véase la figura 6.21.

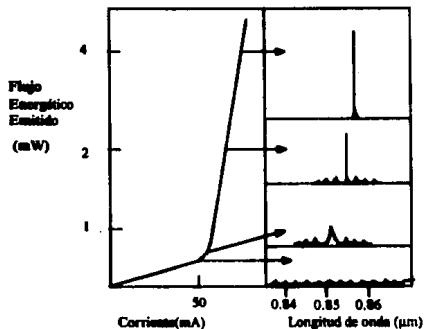


Figura 6.21 Espectro de emisión para cuatro valores diferentes de la corriente inyectada

El desplazamiento del pico hacia longitudes de onda más grandes, cuando aumenta el flujo energético se debe a la variación del ancho de la banda prohibida en función de la temperatura.

6.2.7.4 Modulación

Cuando se aplica un pulso de corriente a un láser de inyección, éste no responde inmediatamente, véase figura 6.22. Hay un retraso T_d entre la corriente I y el flujo emitido P_e , este retraso depende del tiempo de vida T_r de los portadores inyectados. Se tiene entonces que:

$$T_d = \tau \ln \frac{I}{I - I_s} \quad (6.11)$$

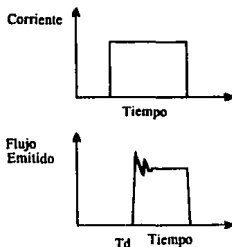


Figura 6.22 Variación en el tiempo del flujo energético emitido por un diodo láser como respuesta a un pulso

El retraso limita el láser a una frecuencia aproximada de 60 Mhz ($\Delta f \approx 0.35/Td$). Una forma de reducir éste retraso es evitar que el dispositivo funcione con emisión espontánea, polarizandolo con una corriente I_p ligeramente superior a I_s como se muestra en la figura 6.23. Como consecuencia el retraso Td disminuye:

$$Td \approx Tr \ln \frac{I - I_p}{I - I_s} \quad (6.12)$$

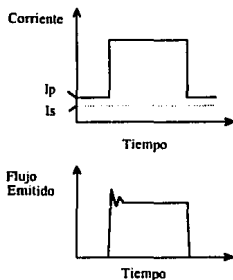


Figura 6.23 Variación en el tiempo del flujo energético emitido por un diodo láser como respuesta a un pulso de corriente inyectada. La polarización con una corriente $I_p > I_s$ reduce considerablemente el retraso Td

6.2.7.5 Degradación

Un láser de inyección se degrada con el tiempo, esta degradación se manifiesta por un aumento de la corriente de umbral I_s y una disminución del rendimiento de la pendiente R . Para tener un flujo energético constante es necesario aumentar la corriente del umbral. Este aumento usualmente es del orden de $\Delta I_s / I_s \approx 0.5\%$ para 1 000 hrs. de funcionamiento.

Las múltiples causas de esta degradación pueden ser debido a una alteración de los espejos, por la oxidación o por una potencia óptica demasiado grande. Los efectos tales como dislocaciones en la cinta pueden igualmente implicar una degradación, ésta aumenta muy rápido con la temperatura de la unión, por lo que es muy importante que los láser estén montados en buenos disipadores térmicos. En la tabla XI se muestran las características de los diodos láser de inyección para comunicaciones ópticas.

Tabla XI

Material	GaAlAs	InGaAsP
Longitud de onda	750 - 900 nm	950 - 1050 nm
Precisión en la especificación de la longitud de onda	± 20 nm	± 30 nm
Potencia media	5 - 20 mW	
Ancho espectral	0.1 - 4 nm	0.1 - 6 nm
Estabilidad de emisión	0.25 nm/ °C	0.50 nm / °C
Corriente de umbral	80 - 150 nA	30 - 100 mA
Ancho de banda típico	0.5 - 2 Ghz.	
Plano paralelo de la unión	10 °	
Plano perpendicular de la unión	40 °	
Fiabilidad(tiempo de vida)	$10^5 - 10^6$ horas	
Tipo de fibra	Multimodo	Multimodo Monomodo

6.3 DETECTORES OPTICOS

El detector óptico es un componente esencial en los sistemas de comunicaciones y es uno de los elementos cruciales que influye en el funcionamiento general del sistema. Su función es

convertir las señales ópticas recibidas en señales eléctricas. Aunque, cuando la atenuación de la señal es considerada junto con el enlace, el funcionamiento del sistema es determinado por los detectores. Mejorar las características y el desempeño de los detectores permite la instalación de pocas estaciones repetidoras.

El detector debe satisfacer requerimientos muy exigentes de funcionamiento y compatibilidad, el siguiente criterio define los requerimientos de funcionamiento y compatibilidad para los detectores que generalmente son similares a los de las fuentes ópticas:

1. **Alta sensibilidad a longitudes de onda de operación.** La primera generación de los sistemas, trabaja con longitudes de onda entre 0.8 y 0.9 μm (compatible con el espectro de los láser GaAIAs y LED). Sin embargo, considerables ventajas pueden ser obtenidas de la segunda generación de fuentes con longitudes de onda que operan por arriba de los 1.1 μm , debido a que la atenuación y la dispersión en la fibra son reducidas. En la actualidad, especialmente en las longitudes de onda alrededor de los 1.3 μm , se pretende que la atenuación y la dispersión en los materiales se reduzca.
2. **Alta fidelidad.** Para reproducir la forma de onda de la señal recibida con fidelidad en transmisiones analógicas, la respuesta de los fotodetectores debe ser lineal con respecto a la señal óptica por un amplio margen.
3. **Gran respuesta eléctrica a las señales ópticas recibidas.** Los fotodetectores deben producir un máximo de señales eléctricas por una cantidad de potencia óptica recibida por ejemplo, la eficiencia cuántica debe ser alta.
4. **Un tiempo corto de respuesta** para obtener un ancho de banda apropiado. Los sistemas actuales trabajan con cientos de Mhz. Sin embargo, aparentemente los futuros sistemas (fibras monomodo) operaran en el rango de los Gigahertz, y posiblemente más.
5. **Un mínimo de ruido** introducido por el detector. Las corrientes de oscuridad y las corrientes de fuga deben ser bajas. También, el ruido del mecanismo de ganancia ya sea que se encuentre localizado dentro o en la circuitería asociada debe ser bajo.
6. **Características de la estabilidad del funcionamiento.** Idealmente, las características del funcionamiento de los detectores deben ser independientes de los cambios en el ambiente. Sin

embargo, los detectores actualmente favorecidos (fotodiodos) tienen características (sensibilidad, ruido y ganancia interna) las cuales varían con la temperatura y por lo tanto, la compensación por los efectos de la temperatura son necesarios.

7. **Pequeños.** El tamaño físico de los detectores debe ser pequeño para un buen acoplamiento con las fibras.
8. **Bajo voltaje de polarización.** Idealmente, el detector no requiere de grandes corrientes o voltajes de polarización.
9. **Alta seguridad.** El detector debe ser capaz de mantener una operación estable a una temperatura ambiente por muchos años.
10. **Bajos costos.** Consideraciones económicas son el factor principal en cualquier sistema de comunicaciones.

6.3.2 Tipos de dispositivos

Para detectar las radiaciones ópticas (fotones) en la región del espectro electromagnético del infrarrojo cercano, fotoemisiones internas y externas de electrones pueden ser utilizadas. Los fotoemisores externos cumplen con algunos de los criterios de funcionamiento pero también son voluminosos y requieren de grandes voltajes para su operación. Sin embargo, los dispositivos de fotoemisión interna especialmente los fotodiodos semiconductores con o sin ganancia interna (avalancha) dan buen funcionamiento y compatibilidad a un costo relativamente bajo. Estos fotodiodos son hechos con semiconductores tales como silicio, germanio y varias aleaciones del grupo III y V, los cuales satisfacen varios de los requerimientos de los detectores. Ellos son por lo tanto, utilizados en muchos de los actuales sistemas de comunicaciones.

El proceso interno de fotoemisión puede llevarse a cabo tanto en semiconductores intrínsecos como no intrínsecos. Con la absorción intrínseca, los fotones recibidos excitan a los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción en los semiconductores, puesto que la absorción no intrínseca involucra la creación de los centros de impureza en los materiales. Sin embargo para una rápida respuesta, el proceso de absorción intrínseco es preferido y actualmente todos los detectores para las comunicaciones por fibra óptica usan fotodetección intrínseca.

6.3.3 Principios de la detección óptica

El proceso básico de detección en un material intrínseco está ilustrado en la figura 6.24, la cual muestra un fotodiodo $p-n$. Este dispositivo es polarizado en inversa y el campo eléctrico generado a través de la unión $p-n$ lanza a los portadores móviles (huecos y electrones) a su respectivo lado (tipo de material $p-n$). Una región de agotamiento o capa es por tanto creada en cualquiera de los lados de la unión. Esta barrera detiene a los portadores mayoritarios que cruzan la unión en dirección opuesta al campo. Sin embargo, el campo acelera a los portadores minoritarios de ambos lados al lado opuesto de la unión, creando la corriente de fuga inversa del diodo. Así que, las condiciones intrínsecas son creadas en la región de agotamiento.

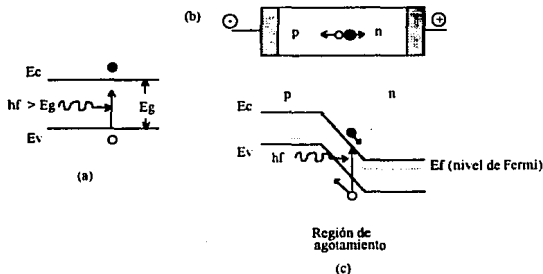


Figura 6.24 Operación de un fotodiodo $p-n$ (a) fotogeneración de un par electrón hueco en un semiconductor intrínseco; (b) estructura de la unión polarizada en inversa mostrando el desplazamiento de los portadores en la región de agotamiento; (c) diagrama de la banda de energía de la unión $p-n$ polarizada en inversa mostrando la fotogeneración y la separación de los pares electrón - hueco

Un fotón incide en o cerca de la región de agotamiento de este dispositivo el cual, tiene una energía más grande o igual a la energía de la banda prohibida E_g del material fabricado (ejem. $hf \geq E_g$), que excitará a un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Este proceso deja un hueco en la banda de valencia, este fenómeno es conocido como fotogeneración de un par electrón-hueco (portador) como se muestra en figura 6.24(b). La probabilidad de que un fotón llegue a generar un par electrón-hueco depende de la banda del semiconductor.

Esta probabilidad es mayor en el caso de un semiconductor de transición de banda directa que en un semiconductor de transición de banda indirecta. Así, los portadores generados cerca de la unión son separados y lanzados por el campo eléctrico para ser desplazados por la corriente en el circuito externo como se muestra en la figura 6.24(b). La fotogeneración y separación de un par portador en la región de agotamiento de esta unión $p-n$ polarizada en inversa es mostrada en la figura 6.24(c).

La región de agotamiento debe ser lo suficientemente ancha para permitir que una cantidad mayor de la luz incidente sea absorbida y pueda generar el mayor número de pares portadores. Sin embargo, debido a que el tiempo de desplazamiento de los portadores en la región de agotamiento restringe la velocidad de operación del fotodiodo, es necesario limitar su ancho.

6.3.4 Absorción

La absorción de los fotones para producir pares portadores y así una corriente, depende del coeficiente de absorción de la luz α_0 , en los semiconductores utilizados para la fabricación de estos dispositivos. A una longitud de onda específica y asumiendo solamente la transición de la banda prohibida la corriente I_p producida por la incidencia de la luz de potencia óptica P_0 es dada por:

$$I_p = \frac{P_0 e (1-r)}{hf} [1 - \exp(-\alpha_0 d)] \quad (6.13)$$

donde:

e = Carga del electrón

r = Coeficiente de reflexión de Fresnel para la interfaz semiconductor - aire

d = Ancho de la región de absorción.

El coeficiente de absorción de los semiconductores depende de la longitud de onda. Esto es mostrado para algunos semiconductores más comunes en la figura 6.25. Se puede ver que hay una variación entre las curvas de absorción de los materiales mostrados y que cada uno es apropiado para diferentes aplicaciones de longitud de onda

TRANSMISORES Y DETECTORES

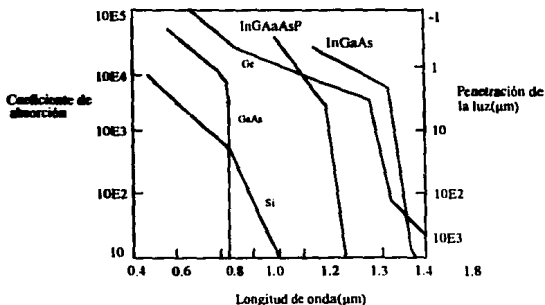


Figura 6.25 Curvas de absorción óptica para algunos de los materiales semiconductores más comunes

Esto resulta de sus diferentes bandas de energía, como se muestra en la tabla XII. Sin embargo, la caída de las curvas en la figura 6.25 varían con la temperatura.

Tabla XII

	Bandas de energía (eV) a 300 °K	
	Absorción indirecta	Absorción directa
Si	1.14	4.10
Ge	0.67	0.81
GaAs	-	1.43
InAs	-	0.35
	-	1.35
InP		
GaSb	-	0.37
InGaAs	-	0.75
GaAsSb	-	1.15

6.3.5 Absorción directa e indirecta: silicio y germanio

La tabla XII indica que el silicio y el germanio absorben luz por transición directa e indirecta. La absorción indirecta requiere de la ayuda de un fotón de tal manera que el movimiento al igual que la energía se conserven. Esto probablemente hace que la transición sea menos probable por absorción indirecta que por absorción directa, donde los fotones no son involucrados. En este contexto, la absorción directa e indirecta puede ser contrastada con la emisión directa e indirecta. Por lo tanto, como se ve en la figura 6.25, el silicio absorbe débilmente en las longitudes de onda de interés para las comunicaciones por fibra óptica (ejem. primera generación de 0.8 a 0.9 μm). Esto es, por qué las transiciones en estas longitudes de onda en el silicio se deben solamente al mecanismo de absorción indirecto. El umbral de la absorción indirecta ocurre a los 1.09 μm . La banda prohibida es de 4.10 eV para la absorción directa que corresponde a un umbral de 0.3 μm en la región ultravioleta, por lo que la longitud de onda queda fuera del rango de interés para las comunicaciones por fibra óptica.

El germanio es otro material semiconductor para el cual la energía más baja de absorción ocurre por transición indirecta. Sin embargo, el umbral por absorción directa ocurre a los 1.53 μm , debajo del cual el germanio llega a ser fuertemente absorbido, esto corresponde al pliegue mostrado en la figura 6.25. Así, el germanio puede ser usado en la fabricación de detectores en el rango de las longitudes de onda de interés (ejem. primera y segunda generación de 0.8 a 1.6 μm), considerado especialmente que la absorción directa ocurrirá hasta un umbral de 1.85 μm .

Idealmente, el material de un fotodiodo debe tener una energía de la banda prohibida ligeramente menor a la energía del fotón correspondiente a la longitud de onda más larga del sistema. Esto da un coeficiente de absorción lo suficientemente grande para asegurar una buena respuesta y para limitar el número de portadores térmicamente generados para alcanzar una baja corriente de oscuridad, como se puede observar en la figura 6.26. El germanio tiene corrientes de oscuridad relativamente más grandes debido a lo estrecho de su banda prohibida en comparación con otros materiales semiconductores. Esta es la desventaja más grande en el uso de los fotodiodos de germanio, especialmente con longitudes de onda más cortas (por debajo de 1.1 μm).

TRANSMISORES Y DETECTORES

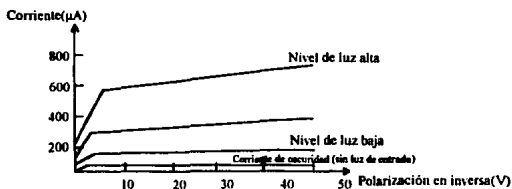


Figura 6.26 Características típicas de salida de un fotodiodo $p-n$

6.3.6 Fotodiodos $p-i-n$

Con el objeto de permitir la operación de los semiconductores en longitudes de onda más grandes donde la luz penetre profundamente, una región de agotamiento más grande es necesaria. Para lograr esto, el material de tipo n es ligeramente contaminado para que pueda ser considerado como intrínseco, y para hacer un contacto de baja resistencia una capa tipo n (n^+) altamente impurificada es añadida. Esto crea una estructura $p-i-n$ o pin , como puede verse en la figura 6.27, donde toda la absorción se lleva a cabo en la región de agotamiento.

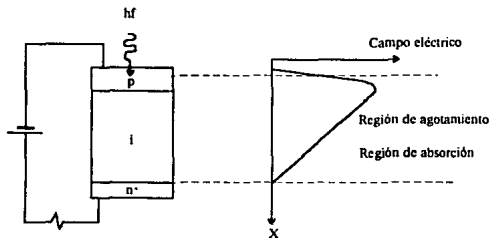


Figura 6.27 Fotodiodo $p-i-n$ mostrando la combinación de la región de agotamiento y de absorción

La figura 6.28 muestra la estructura de dos tipos de fotodiodos de silicio *p-i-n* que operan en longitudes de onda por debajo de $1.09 \mu\text{m}$. El fotodiodo iluminado de frente, cuando opera en la banda de 0.8 a $0.9 \mu\text{m}$ requiere de una región de agotamiento de entre los 20 y $50 \mu\text{m}$ para así obtener una alta eficiencia cuántica (típicamente 85%) junto con una rápida respuesta (menos de 1ns) y baja corriente de oscuridad (1nA). La corriente de oscuridad se genera por la recombinación en la región de agotamiento debido a la falta de luz. La estructura del fotodiodo iluminado lateralmente se muestra en la figura 6.28 (b), donde la luz es inyectada en paralelo al plano de la unión, tiene un gran ancho de absorción ($\approx 500\mu\text{m}$) y por consiguiente es particularmente sensible a las longitudes de onda cercanas a los límites de la banda prohibida ($1.09 \mu\text{m}$), donde el coeficiente de absorción es relativamente pequeño.

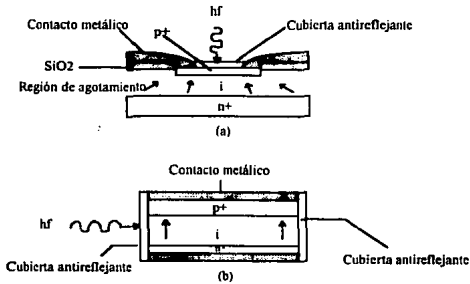


Figura 6.28 (a) Estructura de un fotodiodo *p-i-n* de silicio iluminado de frente ; (b) estructura de un fotodiodo *p-i-n* iluminado lateralmente (paralelo a la unión)

Los fotodiodos *p-i-n* de germanio, los cuales alcanzan rangos de longitud de onda de interés para los sistemas de comunicaciones se encuentran comercialmente disponibles, pero sus corrientes de oscuridad relativamente altas son un problema (típicamente de 100 nA a 20°C , incrementándose a $1 \mu\text{A}$ a 40°C). En la actualidad el material favorecido es el del sistema de red igualada $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} / \text{InP}$, el cual puede detectar longitudes de onda hasta $1.67 \mu\text{m}$.

TRANSMISORES Y DETECTORES

6.3.6.1 Velocidad de respuesta

Tres factores limitan la velocidad de respuesta de un fotodiodo. Estos son:

- 1.-El tiempo de los portadores a través de la región de agotamiento. La velocidad de respuesta del fotodiodo está fundamentalmente limitada por el tiempo que toman los portadores fotogenerados en ser lanzados a través de la región de agotamiento. Cuando el campo en la región de agotamiento excede el valor de saturación, una velocidad (máxima) constante vd es asumida. El tiempo más largo de desplazamiento, Td , es para portadores que deben atravesar el ancho completo de la región de agotamiento w , que está dada por:

$$Td = \frac{w}{vd} \quad (6.14)$$

- 2.- El tiempo de difusión de los portadores generados fuera de la región de agotamiento. La difusión de los portadores es un proceso comparativamente pequeño donde el tiempo de desplazamiento empleado, td , para difundir portadores a una distancia d puede ser escrita como:

$$td = \frac{d^2}{2Dc} \quad (6.15)$$

donde:

Dc = Coeficiente de difusión de los portadores minoritarios

3. La constante de tiempo dada por la capacitancia de la carga del fotodiodo. Un fotodiodo alimentado en inversa da un voltaje dependiendo de la capacitancia causada por la variación de la carga almacenada en la unión.

Aunque todos los factores antes mencionados afectan el tiempo de respuesta de un fotodiodo, lo fundamental es que el ancho de banda está limitado por el tiempo de desplazamiento de los portadores a través de la región de agotamiento. La respuesta de un fotodiodo a un pulso óptico rectangular es mostrado en la figura 6.29. Idealmente, para obtener una eficiencia cuántica alta, el ancho de la región de agotamiento debe ser mucho más grande que el recíproco del coeficiente de absorción ($1/\alpha_0$) para los materiales usados en la fabricación de los detectores de modo que, la mayoría de la luz incidente sea absorbida.

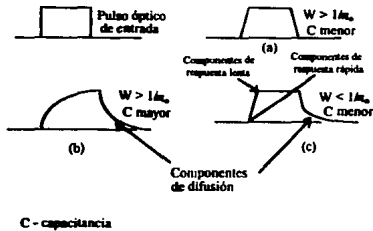


Figura 6.29 Respuesta del fotodiodo a un pulso rectangular óptico

Además, cuando hay difusión de portadores fuera de la región de agotamiento, como es el caso, cuando la región de agotamiento es muy estrecha ($w \leq 1/\alpha_0$) y por lo tanto los portadores son creados por absorción fuera de esta región, entonces el pulso de salida muestra una cola larga causada por el componente de difusión debido a la entrada del pulso óptico como se muestra en la figura 6.29(b). Así que los dispositivos con regiones de agotamiento muy delgadas tienen una respuesta más rápida y componentes de respuesta menos rápidos para sus pulsos de salida como puede ser observado en la figura 6.29(c). La forma de respuesta resulta de la absorción en la delgada región de agotamiento.

6.3.7 Fotodiodos Avalancha (APD)

El segundo tipo más importante de detectores ópticos, es el fotodiodo de avalancha (APD). Este, tiene una estructura más sofisticada que la del fotodiodo $p-i-n$, para crear una región con un campo eléctrico extremadamente grande ($\approx 3 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$) como puede verse en la figura 6.30. Así como existe la región de agotamiento donde la mayoría de los fotones son absorbidos y los primeros pares portadores son generados, existe también una región con un gran campo en la cual los electrones y los huecos pueden adquirir suficiente energía para excitar a los nuevos pares electrón-hueco.

TRANSMISORES Y DETECTORES

Este proceso es conocido como ionización de impacto y es el fenómeno que provoca la avalancha en un diodo polarizado en inversa.

Frecuentemente se requieren de grandes voltajes en inversa (50 - 400 V) para que los nuevos portadores creados por la ionización de impacto puedan por sí mismos producir más portadores. Sin embargo, existen dispositivos que operan con mucho menor voltaje (15 - 25 V) y que se encuentran disponibles.

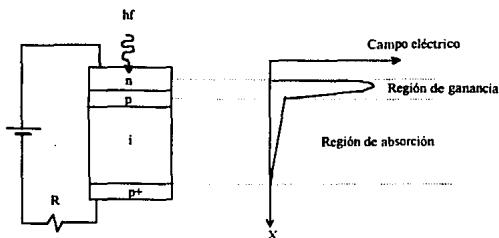


Figura 6.30 fotodiodo de avalancha mostrando la región de ganancia

Factores de multiplicación del orden de 10^4 , pueden ser obtenidos utilizando materiales libres de defecto para asegurar la uniformidad de la multiplicación de los portadores a través del área fotosensitiva. Sin embargo, otros factores afectan la obtención de grandes ganancias dentro del dispositivo. Los *Microplasmás*, los cuales son pequeñas áreas con menos voltaje de ruptura que las que quedan en la unión, deben ser reducidos a través de la selección de materiales libres de defecto junto con un cuidadoso proceso de fabricación. Además, la fuga excesiva por las orillas de la unión puede ser eliminada con el uso de un anillo de seguridad como se muestra en la figura 6.31. Actualmente, fotodiodos avalancha de silicio y germanio se encuentran disponibles.

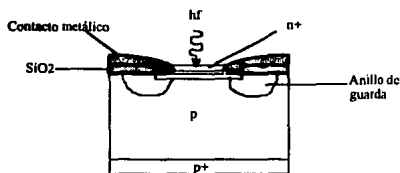


Figura 6.31 Estructura de un fotodiodo de silicio de avalancha con anillo de guarda

La operación de estos dispositivos a altas velocidades requiere de un agotamiento total en la región de absorción. Cuando los portadores son generados fuera de la región de agotamiento, son recogidos lentamente por el proceso de difusión. Esto, tiene el efecto de producir una larga cola de difusión en un corto pulso óptico. Cuando un APD está completamente agotado por emplear campos eléctricos del orden de 10^4 V cm^{-1} en exceso (todos los portadores impulsados a la máxima velocidad). En este caso, el tiempo de respuesta de los dispositivos está limitado por tres factores que son:

- el tiempo de desplazamiento de los portadores en cruzar la región de absorción (ejemplo, el ancho de la región de agotamiento),
- el tiempo que les toma a los portadores el proceso de multiplicación de avalancha, y
- la constante de tiempo RC dada por la capacitancia en la unión del diodo y su carga.

Con una pequeña ganancia, los efectos del tiempo de desplazamiento y de RC dominan dando un tiempo de respuesta y por consiguiente un ancho de banda constante para el dispositivo. Sin embargo, el tiempo de construcción de la avalancha es más largo con una alta ganancia y por tanto el ancho de banda del dispositivo decrece conforme se incrementa la ganancia. Así que, la operación de los APD está dada por el producto de una ganancia constante y el un ancho de banda.

TRANSMISORES Y DETECTORES

Frecuentemente, un pulso asimétrico es obtenido de los APD, el cual resulta de un tiempo relativamente rápido de subida dado por la colección de electrones y el tiempo de bajada, dado por el tiempo de desplazamiento de los huecos viajando lentamente. Por consiguiente, aunque el uso de estructuras y materiales apropiados pueden dar tiempos de subida entre 150 y 200 ps., el tiempo de bajada de 1 ns o más, los cuales son muy comunes porque limitan la respuesta total del dispositivo.

6.3.8 Consideraciones para el funcionamiento del detector de detección directa

Es necesario considerar las propiedades de los detectores en el contexto de los circuitos asociados en el mismo. Es esencial que el detector funcione eficientemente con los circuitos de amplificación y procesamiento de las señales. Inherente a este proceso, se encuentra la separación de la información originalmente contenida en una señal óptica del ruido generado en el resto del sistema y en el propio detector. También como cualquier limitación en la respuesta del detector, impuesta por los circuitos asociados. Estos factores juegan un factor crucial para determinar el funcionamiento del sistema.

Para el diseño de los detectores, es de ayuda considerar el límite en el funcionamiento del sistema establecido por la relación señal a ruido. Es por lo tanto, necesario eliminar las fuentes de ruido dentro de los sistemas de fibra óptica. El ruido en estos sistemas, tiene diferentes orígenes que en los sistemas eléctricos. Ambos sistemas, tienen ruido térmico generado en el detector. Sin embargo, aunque los sistemas de fibra óptica exhiben un poco de ruido, el ruido generado dentro del detector debe ser considerado también como las propiedades del ruido asociadas con los portadores electromagnéticos.

6.3.8.1 Ruido

El ruido, es un término generalmente usado para referirse a cualquier perturbación no deseada que sobre pase la señal recibida en un sistema de comunicaciones. En los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, se preocupan por el ruido generado por los cambios repentinos más que por las perturbaciones que pueden ser una característica de los sistemas de eléctricos (debido a la interferencia electromagnética).

Existen dos tipos principales de ruido debido a la interacción térmica entre los electrones libres y la vibración de los iones en un medio conductor que son:

- a) ruido debido a la corriente de oscuridad y
- b) ruido cuántico.

6.3.8.1.1 Ruido debido a la corriente de oscuridad

Cuando no hay luz incidente en el fotodetector, una pequeña corriente de fuga sigue fluyendo de las terminales de los dispositivos. Esta corriente de oscuridad, contribuye al ruido total del

sistema. Los electrones que dan lugar a esta corriente saltan la barrera de potencial del diodo polarizado en inversa, independientemente unos de otros, en forma aleatoria; el resultado es ruido cuántico que también es ruido blanco.

6.3.8.1.2 Ruido cuántico

La transformación fotón-electrón, por la creación de pares electrón-hueco, tiene naturaleza estadística ya que presenta variaciones alrededor de un valor medio. La generación de los pares electrón-hueco, al ser de naturaleza estadística, hace que la corriente sufra variaciones aleatorias de intensidad en función del tiempo alrededor de su valor medio. Es a lo que se le llama *ruido*. Este ruido, debido a su naturaleza cuántica del flujo energético, se designa como ruido cuántico o ruido de Schottky. Debido a su naturaleza aleatoria, no se puede predecir su variación en el tiempo. El ruido cuántico se forma por una infinidad de componentes de frecuencias diferentes que se extienden de 0 Hz hasta aproximadamente 1×10^{12} Hz.

La figura 6.32, muestra un diagrama de bloques de un detector óptico y varias fuentes de ruido asociadas al mismo. La mayoría de las fuentes de ruido mostradas, aplican para ambos tipos de detectores (*p-i-n* y *APD*). El ruido generado por la radiación, la cual es importante en la propagación atmosférica y en algunos sistemas de cobre, es insignificante para ambos tipos de detectores ópticos y por eso es normalmente ignorado.

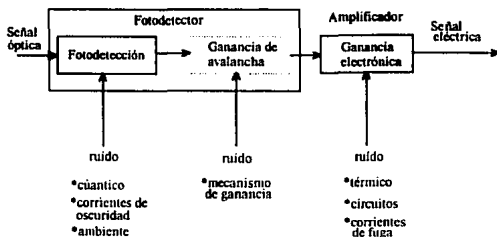


Figura 6.32 Diagrama de bloques de un receptor óptico mostrando varias fuentes de ruido

El fotodiodo de avalancha es el caso más complejo porque incluye el ruido que resulta de naturaleza aleatoria del mecanismo interno de ganancia. Es por lo tanto, el ruido es normalmente considerado en detectores ópticos que emplean fotodiodos con ganancia interna.

Las dos fuentes principales de ruido en fotodiodos sin ganancia interna son; ruido debido a la corriente de oscuridad y el ruido cuántico, los cuales pueden ser considerados como un disparo de ruido en el fotodiodo.

6.4 SISTEMAS DE TRANSMISION Y RECEPCION

La transferencia de información a través de la propagación de la luz en una fibra óptica requiere de la buena implantación de un sistema de comunicaciones por fibra óptica. Este sistema, igual que todos los sistemas, está compuesto por un número de componentes discretos los cuales están conectados de tal manera que les permita trabajar juntos. Por consiguiente, para lograr una comunicación confiable y eficiente utilizando fibras ópticas, es esencial que todos los componentes del sistema de transmisión sean compatibles de tal manera que su funcionamiento individual, hasta donde sea posible, ayude en lugar de degradar el funcionamiento general del sistema.

Los principales componentes de un sistema de comunicaciones por fibra óptica, ya sea para transmisión analógica o digital, son mostrados en el diagrama de bloques de la figura 6.33. El equipo transmisor consiste de un codificador de información seguido de un modulador o manejador electrónico el cual opera la fuente óptica. La luz emitida por la fuente, es propagada a través de una fibra óptica que está incorporada a un cable y que constituye el medio de transmisión. La luz recibida es convertida nuevamente en señal eléctrica por un detector óptico conectado a la entrada del equipo detector. Esta señal eléctrica, es entonces amplificada antes de la decodificación o demodulación para obtener la información originalmente transmitida.

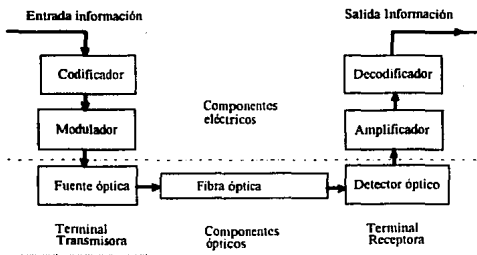


Figura 6.33 Componentes típicos de un sistema de comunicaciones por fibra óptica

6.4.1 Circuito manejador del LED

A pesar de que el LED se encuentra de alguna manera restringido por sus pocas aplicaciones en comparación con el ILD de alta velocidad, es normalmente más fácil de operar. En este contexto, solo se considerarán los circuitos digitales.

6.5 Transmisión Digital

La operación del LED para transmisiones digitales, requiere de prender y apagar una una corriente en un rango de varias decenas a varias centenas de miliamperes. Esto debe hacerse a altas velocidades en respuesta a los niveles lógicos de voltage en el circuito de entrada.

Un requerimiento para las transmisiones digitales, es la interfaz del LED con un circuito lógico como se muestra en la figura 6.34. En este caso, la interfaz lógica debe ser considerada junto con el circuito manejador. La compatibilidad con un TTL puede ser lograda utilizando un circuito integrado comercial como se muestra en la figura 6.34(b) y (c). La configuración mostrada en la figura 6.34(b) utiliza un manejador de línea 74S140 de Texas Instruments, el cual genera corrientes de manejador del orden de los 60 mA en el LED cuando R1 es de 50 Ω . Además, el circuito contiene dos secciones que pueden ser conectadas en paralelo para obtener corrientes de manejador de 120 mA. La incorporación de un capacitor adecuado, por ejemplo 45pF, da un tiempo óptico de respuesta de alrededor de 5 ns cuando se usan LEDs con una capacitancia entre 150 - 200 pF. La figura 6.34(c) muestra la configuración de derivación usando un circuito integrado, TTL standard 75451. El tiempo de respuesta de este circuito derivador, puede ser mejor si se coloca una resistencia de carga entre el switch derivador (colector) y el LED para mantener la carga de la capacitancia en el LED.

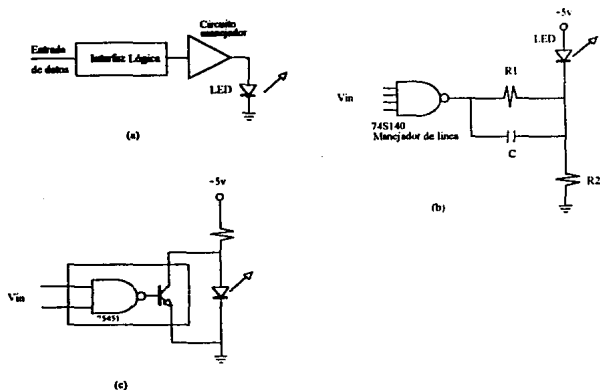


Figura 6.34 Interfaz lógica para la transmisión digital; (a) interfaz del LED con los niveles lógicos de entrada; (b) Un TTL compatible con el LED; (c) TTL circuito divisor.

Una alternativa importante para la configuración de los circuitos manejadores es el circuito acoplador por emisor, el cual es mostrado en la figura 6.35. El LED actúa como una carga en uno de los colectores de tal manera que el circuito ofrēca la ganancia de corriente y por consiguiente una corriente manejadora para el dispositivo. Así, el circuito se parecerá más a un amplificador lineal diferencial, pero que funciona fuera de rango y modo de conmutación. Velocidades más rápidas de conmutación pueden ser obtenidas, debido a que esta configuración no se satura lo cual, evita la degradación causada por la carga acumulada en la base del transistor. También, los requerimientos para el manejo del transistor son menores debido a que el circuito no se satura, y así mantenga una pequeña ganancia en la señal de corriente.

La configuración del circuito manejador de emisor común mostrado en la figura 6.35, es compatible con el circuito lógico de emisor común. Sin embargo, para lograr esta compatibilidad, en el circuito se incluyen dos transistores de corriente que manejan dos niveles de voltaje (alto, -0.8 V y bajo, 0.08 V) y los cuales alimentan el ECL cuando la terminal positiva del LED está conectada a tierra.

La respuesta de este circuito está especificada entre los 50 Mbits-l y los 300 Mbits-l , cuando se utiliza un ELC más rápido y un transistor de alta velocidad. Esta configuración también puede trabajar con otras familias lógicas.

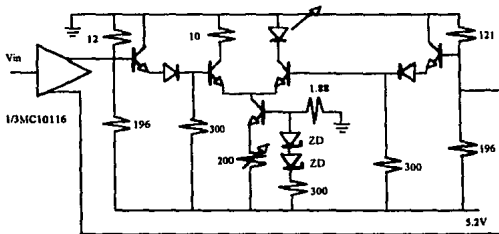


Figura 6.35 Circuito manejador de emisor común el cual es compatible con ECL.

6.6 Circuito Manejador del Láser

El láser, siendo un dispositivo de umbral, tiene diferentes requerimientos de corriente de conducción que el LED. Por ejemplo, cuando una transmisión digital es considerada, el láser normalmente da una polarización mayor, llamada pre-polarización (no hay corriente). Las siguientes, son algunas de las razones para polarizar el láser por debajo del umbral cuando no hay corriente:

- Reduce el retraso en el encendido y previene cualquier oscilación,
- permite compensaciones por los cambios en la temperatura del ambiente y
- reduce el calentamiento de la unión causada por el manejador de corriente digital.

Aunque la polarización cerca del umbral causa emisión espontánea de luz cuando no hay corriente, éste normalmente no es un problema para las transmisiones digitales porque la emisión estimulada es por lo menos 10 veces más grande cuando hay corriente. Un circuito, manejador láser sencillo para transmisiones digitales es mostrado en la figura 6.36. Este es un circuito derivado que utiliza un transistor de efecto de campo (FET) que da una alta velocidad de operación al láser. Se mantiene suficiente voltaje en serie con el láser usando la resistencia R_2 y el capacitor de compensación C de manera que el FET sea polarizado en la región activa. Así, para un voltaje específico de entrada V_{in} (Vias), una cantidad específica del total de la corriente que fluye a través de la R_1 es desviada del láser dejando que el resto de la corriente fluya a través de R_2 y apague el dispositivo.

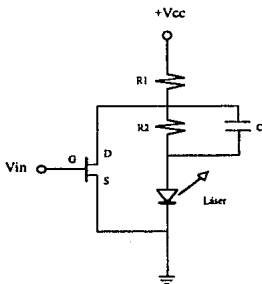


Figura 6.36 Circuito derivador para usar con un láser de inyección

Utilizando arseniuro de galio, el circuito mostrado anteriormente se modula a velocidades de 1 Ghz. s^{-1} . Una alternativa es el circuito manejador láser de alta velocidad que se muestra en la figura 6.37 y que emplea transistores bipolares. Esta configuración del circuito para transmisiones digitales, consiste de dos amplificadores diferenciales conectados en paralelo.

La entrada, la cual es compatible con el ECL, tiene una impedancia de 50Ω por el uso de un emisor seguidor T1 y de una resistencia de 50Ω en paralelo con la entrada.

El transistor T2 se comporta como una fuente de corriente con un diodo zener ZD para ajustar el nivel de la señal para la operación del ECL.

Los dos amplificadores operacionales proporcionan suficiente modulación de la amplitud de la corriente para el láser que trabaja con una corriente de control I_e a través de las dos resistencias de los emisores $Re1$ y $Re2$; I_e esta dada por un circuito controlador de retroalimentación óptica. Finalmente una corriente pre-polarizada es suministrada al láser por una fuente distinta de corriente.

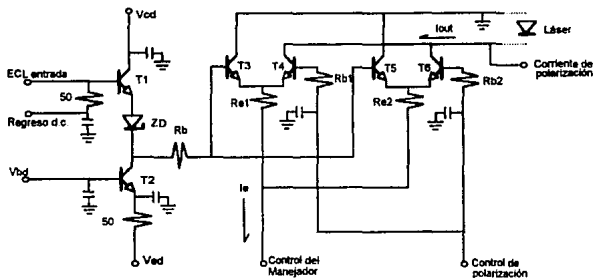


Figura 6.37 Un ECL compatible con un circuito láser de alta velocidad

TRANSMISORES Y DETECTORES

La mayor diferencia entre los circuitos de las figuras 6.36 y 6.37 es la ausencia y el uso respectivamente, de un control de retroalimentación para el ajuste de los niveles de salida del láser. Por esta razón, es poco probable que el circuito derivador de la figura 6.38 sea utilizado para una aplicación en el sistema. Algunas formas de controlar la retroalimentación, para asegurar la operación continua del láser está en función de la temperatura. También, con la edad del láser los niveles del umbral tienden a incrementarse al igual que, las pérdidas internas en el dispositivo. A pesar de que los láser se pueden enfriar para compensar las variaciones de la temperatura, la edad del mismo no puede ser compensada de la misma manera. Sin embargo, ambos problemas pueden ser vencidos controlando la polarización del láser empleando la técnica de la retroalimentación. Esto se logra, utilizando circuitos de retroalimentación de baja velocidad para ajustar la polarización de la corriente estática, cuando esto sea necesario. Por esta razón, es necesario monitorear la salida de la luz para mantener estos aspectos constantes.

6.7 El circuito detector óptico

El diagrama de bloques de un detector de fibra óptica es mostrado en la figura 6.38. Después de que la señal óptica ha sido convertida en una corriente eléctrica por el detector, esta es amplificada para obtener los niveles adecuados de la señal.

Una amplificación inicial es hecha en el circuito preamplificador para mantener el ruido al mínimo y evitar que las señales recibidas sean corrompidas. Como las fuentes de ruido pueden ser dominadas dentro del amplificador, su configuración y diseño son los principales factores para determinar la sensibilidad del detector. El amplificador principal, provee amplificación adicional de bajo ruido a la señal para incrementar los niveles de la señal para los siguientes circuitos.



Figura 6.38 Diagrama de bloques con los elementos principales de un detector de fibra óptica

La función del último elemento en el detector, el filtro, es la de maximizar la señal recibida con respecto al ruido conservando las características esenciales de la señal.

En los sistemas digitales, la función principal del filtro es la de reducir la interferencia intersimbólica, mientras que en los sistemas analógicos es generalmente usada para mantener y la fase de respuesta de la señal recibida dentro de ciertos límites.

El filtro, es también diseñado para reducir el ancho de banda del ruido así como también los niveles de ruido en la banda. En este caso nos enfocaremos al estudio del preamplificador. La elección de la configuración del circuito para el preamplificador normalmente depende de la aplicación del sistema.

Las configuraciones preferidas de preamplificación por el bajo ruido de operación emplean amplificadores de alta impedancia o de transimpedancia. Empleando cuidadosamente estas estructuras para el diseño del circuito, ayuda al acoplamiento de una ganancia alta operando con bajo ruido y de esta manera mejorar la sensibilidad del detector.

Aunque un transistor bipolar es empleado en el circuito emisor seguidor para darse cuenta de que se trata de un amplificador delantero de alta impedancia. El FET es generalmente usado para este propósito debido a su bajo ruido de operación. Cuando se trabaja en estos modos, la potencia del FET y la impedancia de salida son altos y tienden a minimizar la contribución de ruido para las siguientes etapas.

El amplificador de transimpedancia encuentra gran aplicación en el diseño de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica. Esta estructura, actúa como un convertidor de corriente-voltaje con bajo ruido de operación sin grandes limitaciones o anchos de banda impuestos por el diseño de alta impedancia.

TRANSMISORES Y DETECTORES

Un ejemplo de la configuración de transimpedancia es mostrada en la figura 6.39, presentando una estructura de transistor bipolar consistente de una etapa de emisor común seguido por un emisor seguidor con toda la retroalimentación a través de la resistencia R_f . La salida de los niveles de la señal puede ser incrementada poniendo una segunda etapa de emisor común después del emisor seguidor.

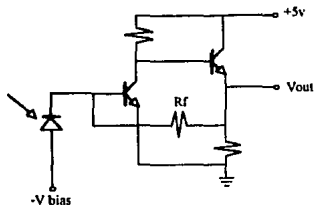


Figura 6.39 Configuración de una transimpedancia.

7. DISEÑO DEL ENLACE

7.1 EQUIPOS CARACTERISTICOS

7.1.1 Nociones básicas

Para la conversión de señales luminicas y el transporte de éstas a través de un conductor de fibra óptica se requiere en su comienzo y su final elementos de emisión y recepción adecuados para convertir las señales eléctricas en ópticas y viceversa. En el extremo emisor, una señal eléctrica modula la intensidad de una fuente luminosa. La señal óptica se acopla al conductor de fibra óptica y llega al extremo receptor, donde un receptor de luz la convierte en una señal eléctrica.

Para transmitir señales eléctricas a través de conductores de fibras ópticas se utilizan sistemas de transmisión ópticos. Sus componentes son, el conversor electro-óptico como emisor de luz al comienzo del tramo, el tramo de conductor de fibra óptica propiamente dicho y el conversor óptico-eléctrico, como receptor de luz al final del tramo. Al igual que en los sistemas de conductores metálicos existen los "Equipos Terminales" al comienzo y al final de los tramos; entre ambos extremos están los regeneradores para la transmisión digital.

Las principales funciones de la técnica de transmisión digital son: la conversión de señales analógicas en digitales multiplexadas con velocidades de transmisión normalizadas y la transmisión de dichas señales digitales a través de conductores de fibras ópticas. Con las técnicas digitales y en especial el multiplexado por división de tiempo con modulación de pulsos codificados (PCM) se han establecido las condiciones básicas para la integración de servicios.

En los extremos de todas las secciones de las líneas básicas se conectan "Equipos Terminales de Líneas" que actúan como nexo entre los multiplexores u otras fuentes de señales y el conductor de fibra óptica. Estos en el lado emisor convierten la señal digital suministrada en una señal adecuada para la transmisión óptica. Para ello, se compensa la distorsión de la señal eléctrica de entrada, se le regenera, y se convierte en una señal binaria con código de línea 5B/6B. La señal de entrada compuesta de elementos binarios se divide en palabras de 5 bits y estas se convierten en palabras de 6 bits. En el módulo emisor, esta secuencia de palabras de 6 bits se convierte, por medio de diodos láser, en una señal óptica apta para la transmisión

DISEÑO DEL ENLACE

7.1.2 Equipos de Línea

El elemento básico de un sistema de transmisión por fibra óptica es el equipo de línea, con los "Equipos Terminales de Línea" al comienzo y al final de la transmisión óptica y, en el caso de que distancias prolongadas lo hagan necesario, los "Regeneradores Intermedios". Por lo general para las velocidades binarias útiles de 140 y 565 Mbit/s se ofrecen dos versiones del equipo de línea, uno con equipos independientes para la unidad de multiplexado y el equipo terminal de línea y otro ofreciendo la integración de ambos equipos.

En el sentido de transmisión, la señal a transmitir atraviesa primeramente el módulo interfaz en el equipo terminal de línea y se convierte en una señal puramente binaria; acto seguido se mezcla en el módulo llamado Scrambler. Con el Scrambler se asegura que incluso con cualquier secuencia de 0 y 1 en la señal útil pueda extraerse el reloj en el regenerador. Después de eso, en el codificador de línea 5B/6B se añade a cinco bits útiles un sexto bit según un alfabeto prefijado, originándose el código de línea 5B/6B.

El significado de ello consiste en que la calidad de transmisión del sistema se puede supervisar durante el funcionamiento mediante la suma digital en curso, totalmente independiente del contenido de la señal útil. Para esto no se toma en consideración que aumente la velocidad del reloj en la línea. En el transmisor óptico se convierten las señales binarias eléctricas 5B/6B en señales ópticas y se acoplan a la fibra óptica. En el caso de una interrupción de la ruta de transmisión óptica, un equipo de seguridad que actúa automáticamente desconecta el láser.

En la dirección de recepción, se reconvierten las señales ópticas en señales eléctricas en el receptor óptico, y a continuación, se regeneran mediante el regenerador en lo que respecta a sus amplitudes y fases. Siguen la codificación de línea 5B/6B, la regeneración de la señal y en la interfaz tiene lugar la entrega de las señales transmitidas. En un "Regenerador Intermedio" la señal óptica debilitada es convertida nuevamente en una señal eléctrica, se regenera, amplifica y se convierte nuevamente en forma óptica.

7.1.3 Alojamiento de los equipos de transmisión

Los equipos terminales de línea se alojan normalmente en edificios administradores de telecomunicación. Del mismo modo se pueden ubicar los regeneradores intermedios. En el caso de que los centros de población se encuentren demasiado lejos los regeneradores intermedios se pueden colocar en casetas independientes. Otra forma son los alojamientos enterrados cuyas dimensiones dependen del número de regeneradores intermedios y de la disipación de calor .

7.1.4 Alimentación de energía

Quando el equipo se encuentra en edificios propios para tal efecto su alimentación es directa de la red de energía pública. En el caso de que no exista ninguna toma de energía, para el caso en que el equipo no se localice en una población, se utiliza la telealimentación. Se sugiere que la telealimentación no ocupe la combinación de cable de cobre y fibra óptica bajo una misma cubierta por el peligro de rayos.

7.1.5 Supervisión y localización de fallas

Para detectar reducciones de calidad del servicio limitadas en el tiempo, se requiere un sistema de supervisión en servicio, sin tener que desconectar el equipo. La finalidad es que posibilite la supervisión de los regeneradores intermedios y del equipo terminal continuamente y así poder localizar fallas. La información de la falla se transmite a los equipos terminales por medio de un canal de transmisión separado a través de un conductor de fibra óptica propio. En un equipo localizador de fallas se evalúan las informaciones que llegan desde cada uno de los regeneradores intermedios. Conectando un impresor es posible evaluar durante el servicio, de forma continua, la tasa de errores de bits de todo el tramo o de determinados regeneradores intermedios seleccionados de modo sistemático.

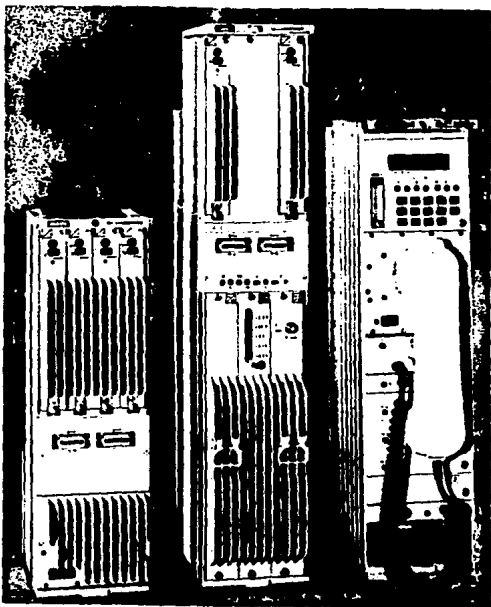


Figura 7.1 Equipo terminal de línea de larga distancia para fibras ópticas monomodo para velocidad de transmisión de 565 Mbps

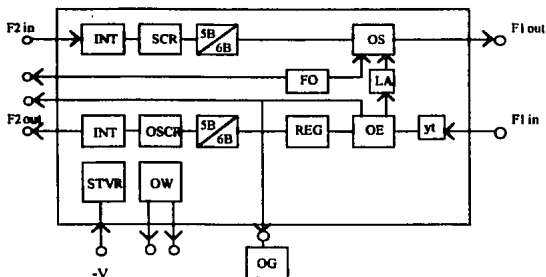


Figura 7.2 Diagrama de las funciones básicas del equipo de línea de un sistema por fibra óptica

En la tabla XIII se muestran las especificaciones de un equipo terminal de línea típico.

Tabla XIII

Model	LA140GF	LA565GF
Transmission capacity	140 Mbit/s	4 - 140 Mbit/s
Interface code	CMI	AMI
Line code	5B 6B	5B 6B
Line data rate	168 MBaud	678 MBaud
Optical fibre	single mode	single mode
Operating wavelength	1280 to 1330 nm	1280 to 1330 nm
Optical transmitter	Laser	Laser
Spectral width	≤ 10 nm	≤ 4 nm
Output level	-3dBm to -6dBm	-3dBm to -6dBm
Optical receiver	PIN photodiode	Ge avalanche photodiode
Optical receive power ($BER = 10^{-9}$)	-39 dBm	-33 dBm
Dynamic range	19 dB	27 dB
Max section loss	29 dB	22 dB
Monitoring system	in service monitoring	in service monitoring

7.2 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ENLACE

7.2.1 Cajas de empalme

Al ser efectuado un empalme por fusión, se deben proteger las uniones de las fibras del ambiente externo y así mismo tener la posibilidad de tener acceso para un mantenimiento futuro. Con tal fin existen las cajas de empalme, las cuales pueden ser instaladas en postes, pozos, interiores, o ser enterradas directamente, por lo tanto, deben ser resistentes a la humedad, a la corrosión, a esfuerzos mecánicos y a las temperaturas extremas. Existen principalmente dos tipos de cajas: las cilíndricas y las rectangulares.

7.2.2 Caja de empalme cilíndrica

Este tipo de caja consta de dos tapas circulares unidas mediante dos postes o barras. Incluyen charolas organizadoras para el acomodo de las fibras, los accesorios necesarios para fijar el cable y una funda plástica o cubierta moldeada en forma cilíndrica para cubrir todo el arreglo.

Para este tipo de caja es necesario hacer las perforaciones en las tapas circulares, las cuales deben ser de igual diámetro que el cable a empalmar. En algunas cajas cilíndricas, las tapas vienen en dos partes y éstas se deben ensamblar y sellar una vez que se ha colocado el cable.

Para poder montar el cable óptico en la caja es necesario prepararla. Para esto se debe remover la cubierta externa, la armadura y el refuerzo textil del cable una distancia de 1.20 a 1.50 m dependiendo del tamaño de la caja. Los elementos centrales de tensión deben ser unidos entre sí o bien a una estructura de la caja para evitar que el cable tenga movimientos indeseados y para mantener la continuidad de los elementos mecánicos. Una vez elaborados los empalmes estos deben ser colocados en los organizadores, los cuales son en forma de charola.

Con el propósito de cerrar la caja, se coloca una funda plástica alrededor de todo el arreglo de manera que quede en forma simétrica. Esta funda se cierra con un fleje metálico o plástico, un sellador o aplicando calor.

Para colocar este tipo de caja en postes, en pozos, o en interiores se requiere de herrajes especiales para su fijación. La desventaja de este tipo de cajas es que cuando se quiera dar mantenimiento se deben destruir los elementos de la cubierta exterior.

7.2.3 Caja de empalme rectangular

Esta caja consiste en una estructura de acero inoxidable resistente a los ácidos con organizadores en forma de charolas también de acero inoxidable. La caja se abre quitando los tornillos de la tapa y se limpia. El cable es insertado en el cojinete correspondiente ya sea para cable con o sin armadura. al cojinete se le adhiere una parte de la manga termocontráctil y al cable la otra. Para proteger el cable del calor aplicado a la manga, se le agrega una cinta de aluminio. En el caso de que el cable tenga una armadura de alambres de acero ésta se retira, se aplica una manga a la cubierta interna para que se sujete al cojinete, se reinstala la armadura, y se le aplica otra manga termocontráctil. es importante hacer correctamente las mediciones en el cable para su preparación, ya que se corre el riesgo de dejar con juego el cable una vez instalado o que no alcance la fibra óptica en el momento del empalme. también debe cuidarse la instalación de las mangas termocontráctiles para que no quede el cable con esfuerzos mecánicos indeseables.

Para la instalación del cable en la caja, se instala el cojinete en el orificio correspondiente en la caja. Debe asegurarse que el cojinete quede fijo y en la posición correcta. Se retiran las cubiertas del cable y sus rellenos de forma que queden las fibras con cubierta secundaria y el miembro central de tensión. Este último se mide y se corta de tal forma que al fijarlo al sujetador en la caja, libere de esfuerzos mecánicos al resto del cable. En caso de que el cable óptico contenga pares metálicos para señalización, estos se empalman aislándose y fijándolos en el sujetador.

Las fibras se colocan en los organizadores. Se toma un tubo apretado u holgado y se coloca en forma precisa, marcando el punto donde se empalmará, esta medida se aplica a las demás fibras marcándolas y cortando los excesos. Una vez hecho esto, se retira la cubierta secundaria de la fibra y se empalma. Después de cada empalme, este se protege con un pequeño tubo termocontráctil que substituye a la cubierta primaria. Estos tubos son entonces sujetos en cada organizador.

Para cerrar la caja se le aplica aire caliente a su interior para eliminar humedad. Después se coloca la tapa apretando los tornillos en el orden especificado por el fabricante para lograr una alta hermeticidad. Para colocar este tipo de caja en postes, pozos, muros o interiores se utiliza el herraje integrado a la caja para su sujeción. Si se quiere enterrar directamente solo se requiere de señalización para su protección e identificación. En general las ventajas que ofrecen las cajas rectangulares son de que se puede abrir, cerrar y montar. Una vez que se ha cerrado la caja esta puede abrirse para mantenimiento sin destruir ningún elemento. Ofrece una alta protección al cable y a los empalmes. Resiste la corrosión, la humedad, el fuego y el agua.

DISEÑO DEL ENLACE

7.2.4 Cajas para regeneradores

Con el fin de proteger a los regeneradores se usan cajas subterráneas de acero con protección anticorrosiva. Una vez instaladas bajo tierra, estas cajas apenas están expuestas a variaciones de temperatura exterior y son de difícil acceso a personas no autorizadas. La tapa se atornilla firmemente y la caja queda cerrada herméticamente preservando su contenido. Existen cajas para alojar de 5 y hasta 30 regeneradores intermedios incluyendo sus dispositivos de telealimentación.

7.2.5 Empalmes y conectores

Un empalme es una unión entre dos cables ópticos. Se requiere que los empalmes puedan ejecutarse fácil y rápidamente además de presentar una baja atenuación. Un empalme puede ser del tipo mecánico usando elementos simples o por fusión usándose aparatos especializados. En ambos métodos se presentan atenuaciones del orden de 0.1 y 0.2 dB por empalme.

Suponiendo que las fibras a ser empalmadas tienen el mismo diámetro del núcleo, diámetro del revestimiento y la misma apertura numérica se causan pérdidas mayores por defectos de la técnica de empalme como el desplazamiento paralelo de los ejes de las fibras, el error angular entre los ejes de las fibras, y la separación entre las superficies de los extremos de las fibras. Todos estos errores son sumados.

Los conectores son uniones removibles que deben cubrir los requisitos de fácil ensamble, estandarización, y baja atenuación. Una manera de disminuir las pérdidas del conector, especialmente en los errores radiales, es usar el llamado conector de doble excentricidad. Montando las fibras en el conector con una cierta excentricidad y moviendo los ejes del conector lateralmente, si las dimensiones son correctas, existen dos posiciones para las cuales es bueno el alineamiento de los extremos de la fibra. El ajuste se hace en el campo y tiene ventaja que las pérdidas por dispersión de potencia pueden ser indicadas y minimizadas en ese punto. La atenuación es menor de 0.5 dB.

7.2.6 Procedimiento para la instalación de cajas de empalme

Los procedimientos que se siguen para este tipo de empalme son:

- a) **Preparación de la caja.** La caja se abre retirando los tornillos de la tapas se limpia y a los cojinetes se les quita la grasa que pudiera tener.

- b) Preparación del cable.** El cable es insertado en el cojinete correspondiente ya sea para cable con o sin aramadura. Al cojinete se le adhiere un parte de la manga termocontráctil y al cable de la otra, para proteger el cables del calor aplicado a la manga, se le agrega una cinta de aluminio.

Es importante hacer correctamente las mediciones en el cable para su preparación, ya que se corre el riesgo de dejar con juego el cable una vez instalado o bien que no alcance la fibra óptica en el momento del empalme.

- c) Instalación del cable en la caja.** Se instala el cojinete en el orificio correspondiente en la caja, debe asegurarse que este quede fijo y en la posición correcta.

Se retiran las cubiertas del cable y sus rellenos de forma que queden las fibras con cubierta secundaria y el miembro central de tensión, este último se mide y corta de tal forma que al fijarlo al sujetador de al caja, se liberen los esfuerzos mecánicos al resto del cable. Las fibras se colocan en los organizadores, se toma un tubo apretado y se coloca en forma precisa, marcando el punto donde se empalmará, esta medida se aplica a las demás fibras marcándolas y cortando los excesos.

- d) Cierre de la caja.** Para cerrar la caja se aplica aire caliente a su interior para eliminar humedad, además se colocan bolsas secantes para absorber la humeda residual. Después se coloca la tapa apretando los tornillos en el orden especificado por el fabricante para lograr una alta hemetidicidad.
- e) Instalación.** Para colocar este tipo de caja en poste, muros o interiores, se utiliza el herraje integrado a la caja para su sujeción.



Figura 7.3 Cajas de empalme para fibras ópticas

7.3 DATOS Y ESPECIFICACIONES PARA EL ENLACE

7.3.1 Datos fundamentales

Para proyectar una ruta de transmisión en forma óptima hay que considerar una serie de parámetros de planificación bajo los puntos de vista geográficos, técnicos, y económicos.

Entre las características técnicas, el primer dato fundamental es el de conocer el tipo de señal a transmitir. El segundo dato fundamental relacionado con la cantidad de información que hay que transmitir por unidad de tiempo, en un sistema digital, es la velocidad de transmisión binaria. Como tercer dato fundamental tenemos la calidad de la señal eléctrica recuperada a la llegada. Esta calidad depende del tratamiento posterior que se le da a la señal recuperada y se especifica en un sistema digital por la tasa de errores de bits (BER). Otro dato fundamental es la longitud del enlace, y del análisis de éste se determinará si es necesario el uso de repetidores o no y el número de estos en su caso. Por último, se debe considerar la selección de componentes que serán usados como las fuentes, las fibras, los detectores, y todos los dispositivos electrónicos dependiendo de su precio. Los factores limitantes en el comportamiento del sistema, asociados a la distancia de transmisión y a las propiedades de la señal, son la atenuación y el ancho de banda.

7.3.2 Atenuación de la transmisión

La atenuación de la transmisión (α) es la atenuación total medida en dB entre dos interfaces dadas. Esta atenuación será provocada por:

A_{TF}	=	Pérdidas de inserción del transmisor a la fibra	(dB)
A_C	=	Atenuación en el conector	(dB)
A_S	=	Atenuación en el empalme	(dB)
A_F	=	Atenuación en la fibra óptica	(dB/Km)
A_{FR}	=	Pérdidas de inserción del receptor a la fibra	(dB)
P_T	=	Potencia de salida del transmisor (en la interface)	(dBm)
P_R	=	Potencia de entrada al receptor (en la interface)	(dBm)
l	=	Longitud de la fibra óptica	(Km)
n	=	Número de conectores o empalmes	

$$\alpha = A_{TF} + n_1(A_C) + n_2(A_S) + l(A_F) + A_{FR} \quad (7.1)$$

$$\alpha = P_T - P_R \quad (7.2)$$

7.3.3 Margen del sistema

El margen del sistema es el número de dB disponible por arriba del más bajo nivel necesario para el receptor. Un margen del sistema de aproximadamente 6 dB se considera suficiente para cubrir los incrementos de atenuación producidos por variaciones de temperatura, envejecimiento, y reparaciones de cable.

7.3.4 Método para el cálculo de la atenuación del sistema

Un método sistemático para diseñar un enlace óptico con respecto a la atenuación, se puede resumir de la siguiente manera.

- Definir las interfaces ópticas del transmisor/receptor.
- Determinar el nivel de salida óptica del transmisor en su interface, por medición o datos del fabricante.
- Determinar el límite de sensibilidad óptica en su interface para obtener las propiedades deseadas de la señal en la interface eléctrica del receptor.
- Calcular o medir la atenuación total de la transmisión entre las dos interfaces ópticas.
- Calcular el margen del sistema (M). El margen del sistema deberá de cubrir la degradación del transmisor y receptor por cambios de temperatura, posibles reparaciones de cables, desgaste de los conectores y cambios de temperatura.

$$M = (P_T - P_{R_{min}}) - \alpha \quad (7.3)$$

donde:

P_T = Nivel de salida óptica del transmisor

$P_{R_{min}}$ = Sensibilidad óptica del receptor

α = Atenuación óptica total

Las pérdidas por inserción entre el transmisor y la fibra dependen de la fuente de luz y de los parámetros de la fibra. Un método común para facilitar el manejo de los módulos y el cable, es proveer al módulo transmisor de una fibra corta llamada pig-tail terminada en un conector. La pérdida de inserción entre fibra y receptor es generalmente despreciable desde que la superficie del detector es mucho más grande que la superficie de la fibra.

En modulación digital la sensibilidad límite del receptor está determinada por la frecuencia de los bits y por la elección de los componentes.

7.3.5 Método para el cálculo del ancho de banda del sistema

Con el propósito de alcanzar una baja distorsión de la señal digital transmitida por el enlace, éste debe tener un ancho de banda suficiente. Una regla práctica para señales digitales es mantener la longitud del pulso transmitido 1.5 veces más largo que el tiempo total de elevación del enlace.

El tiempo total de elevación (T) se calcula sacando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los tiempos de crecimientos del transmisor, receptor y fibra.

Un método sistemático de determinar el ancho de banda de un enlace por fibra óptica, se puede reducir de la siguiente manera.

- Determinar el tiempo de elevación / caída en el transmisor por datos técnicos o por medición. T_T
- Determinar el tiempo de elevación / caída en el receptor por datos técnicos o por medición. T_R
- Determinar el tiempo de elevación / caída en la fibra óptica por datos técnicos o por medición. T_F
- Calcular el tiempo de elevación / caída total mediante:

$$T = \sqrt{(T_T^2 + T_R^2 + T_F^2)} \quad (7.4)$$

- Calcular el ancho de banda

$$B_{3dB,el}(GHZ) = \frac{0.34}{T(ns)} \quad (7.5)$$

- Regla práctica:

$$T_{PULSO} \geq 1.5T \quad (7.6)$$

- NRZ velocidad de bits (Gbits/s) =

$$\frac{1}{T_{pulso}(ns)} \leq \frac{0.67}{T(ns)} \quad (7.7)$$

- Dispersión

$$\psi_{tot} \approx 0.9T \quad (7.8)$$

DISEÑO DEL ENLACE

El tiempo de elevación en las fibras está determinado por dos componentes: dispersión del material y modal. La dispersión del material es una constante y normalmente es despreciable. La dispersión modal puede ser una limitante en enlaces con fibras con índice escalonado, por lo cual usaremos en nuestro diseño fibras monomodo donde su dispersión modal es cero.

7.4 CALCULO DEL ENLACE

Al planear un sistema de fibras ópticas, debemos de definir los requerimientos de nuestra aplicación, de tal manera que podamos especificar nuestras necesidades. Las principales cuestiones involucran la velocidad de transmisión y las distancias. después de estos requerimientos básicos se evalúan otros factores como lo son:

Tipo de fibra, longitud de onda de operación, potencia transmitida, tipo de fuente, sensibilidad del receptor, tipo de diodo receptor, código de modulación, número de conectores, empalmes y el ambiente. El ambiente involucra temperatura, humedad, flameabilidad y esto determina la selección del cable óptico.

La tarea básica del enlace es conducir suficiente potencia del transmisor al receptor. El presupuesto es la diferencia entre la potencia transmitida y la sensibilidad del receptor.

7.4.1 Umbral de detección

El umbral de detección P_{m} depende principalmente de la tasa de error en los bits (BER) necesaria. En un sistema digital, la tasa de error en los bits por lo general se toma igual a 10^{-9} . El umbral de detección depende de la velocidad de transmisión binaria, de la capacidad del fotodetector, y de la sensibilidad del fotodetector.

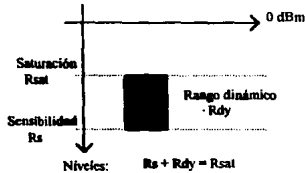


Figura 7.4 Umbral de detección y Rango de Saturación

7.4.2 Flujo energético emitido por la fuente

En un sistema de telecomunicación de fibra óptica, el umbral de detección es el flujo energético modulado promedio, requerido en el detector. Por lo tanto es necesario conocer el flujo energético modulado promedio, emitido por la fuente óptica para poder compararlo con el umbral de detección y valorar así las pérdidas admisibles entre la fuente y el detector ópticos. En un sistema digital con igual probabilidad de estados altos y bajos se tiene:

$$P = 0.5P_m \quad (7.9)$$

donde:

P_m = es el flujo energético emitido para un estado alto.

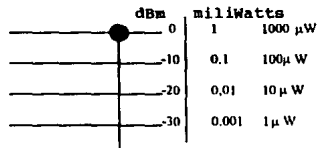


Figura 7.5 Flujo energético emitido por la fuente

7.4.3 Pérdidas por acoplamiento y conexiones

Las pérdidas por acoplamiento entre la fuente y la fibra óptica son las más importantes. Las pérdidas son generalmente muy bajas en el detector óptico, si el área del detector es superior al área del haz luminoso que sale de la fibra.

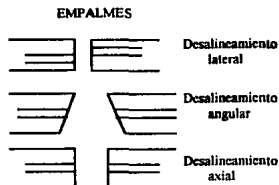


Figura 7.6 Causas de pérdidas en empalmes

7.4.4 Representación gráfica del cálculo energético

Cuando se conoce el umbral de detección P_{om} (dBm), el flujo energético emitido por la fuente P (dBm) y las pérdidas totales de acoplamiento D_T (dB), se pueden calcular las pérdidas admisibles A (dB) debidas a la atenuación de la fibra. La ecuación fundamental del cálculo energético es:

$$P_{om} \leq P - (D_T + A) \quad (7.10)$$

Por precaución, para tomar imponderables como lo son la degradación de los componentes y las variaciones de temperatura, se da un margen de seguridad M de unos cuantos dB (aproximadamente 6 dB).

$$P_{om} + M \leq P - (D_T + A) \quad (7.11)$$

La siguiente ecuación nos permite calcular las pérdidas admisibles A conociendo las otras magnitudes

$$A \leq P - (P_{em} + D_r + M) \quad (7.12)$$

las pérdidas debidas a la atenuación A son:

$$A(\text{dB}) = \alpha(\text{dB} / \text{Km}) \cdot L(\text{Km}) \quad (7.13)$$

donde:

α = es el coeficiente de atenuación de la fibra a la longitud de onda de emisión de la fuente óptica

L = es la longitud de la fibra

Conociendo A y α se deduce la longitud máxima posible para el enlace. Este cálculo se puede hacer gráficamente. sobre la gráfica se pone en las ordenadas el flujo energético (en dBm) y en las abscisas la distancia.

Para $L = 0$, se pone en las ordenadas el flujo promedio modulado P emitido por la fuente óptica (punto A). Se quita después la pérdida por el acoplador emisor-fibra (punto B). El valor obtenido representa en dB el flujo energético promedio efectivamente acoplado a la fibra.

Desde el punto B, se traza una recta de pendiente igual a la atenuación α de la fibra elegida. Si se utiliza un conector fibra-fibra, o si se hace un empalme, se marca la pérdida correspondiente en la distancia L_1 , de la conexión (del punto C al punto E). El punto F constituye el límite en flujo energético tomando en cuenta el umbral de detección y el margen de seguridad. L_M es la longitud máxima posible del enlace para una fibra de coeficiente de atenuación α .

DISEÑO DEL ENLACE

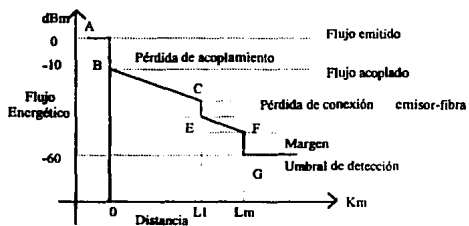


Figura 7.7 Representación gráfica del cálculo energético

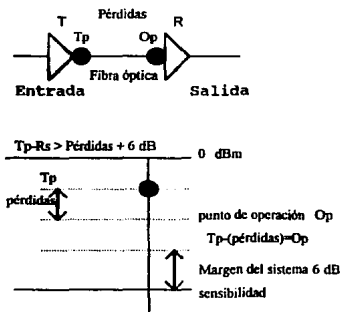


Figura 7.8 Representación gráfica de los objetivos de diseño

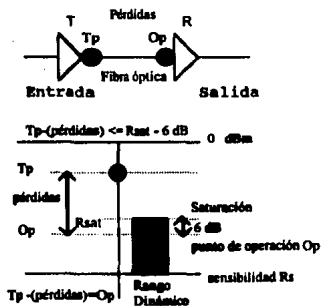


Figura 7.9 Representación del Rango Dinámico

7.4.5 Cálculo numérico del enlace

Consideraremos para nuestro enlace el uso de fibra monomodo de dispersión corrida.

Dada la sensibilidad del equipo receptor

$R_s = -30 \text{ dBm}$

Pérdidas entre el transmisor y el receptor

Pérdidas = 22 dB

Pérdidas del sistema + margen de seguridad 3dB

25 dB

Encontrar el flujo energético emitido por la fuente

$T_p = X \text{ dBm}$

$$T_p - R_s \geq 25 \text{ dB}$$

$$T_p - (-30 \text{ dBm}) \geq 25 \text{ dB}$$

$$T_p = (-30 \text{ dBm}) + 25 \text{ dB} = -5 \text{ dBm}$$

DISEÑO DEL ENLACE

Dado un enlace telefónico mediante fibra óptica monomodo de dispersión corrida cuya atenuación es de 0.2 dB/Km y tiene una longitud de 400 Km, 4 conectores y 10 empalmes, qué pérdidas tendrá el sistema. Si el equipo de transmisión y recepción fueran los del cálculo anterior determinar si requiere de regeneradores.

$$\text{Pérdidas} = \text{Fibra} + \text{Conectores} + \text{Empalmes}$$

$$\text{Pérdidas} = 400(0.2) + 4(0.5) + 10(0.2)$$

$$\text{Pérdidas} = 80 + 2 + 2 = 84 \text{ dB}$$

Puesto que la potencia emitida por el equipo transmisor es de -5dBm y la sensibilidad del equipo receptor es de -30 dBm se concluye mediante el análisis gráfico que el presupuesto de potencia es insuficiente y requerirá de regeneradores.

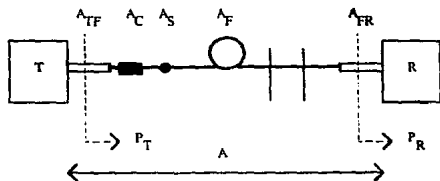


Figura 7.10 Representación de los componentes que influyen en la atenuación de la transmisión

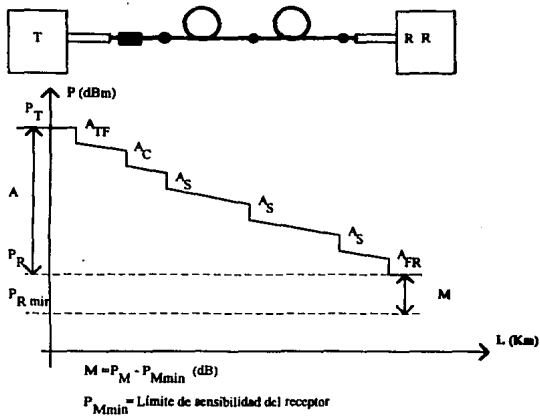


Figura 7.11 Gráfica que muestra los parámetros a considerar en el diseño de un enlace de fibra óptica

DISEÑO DEL ENLACE

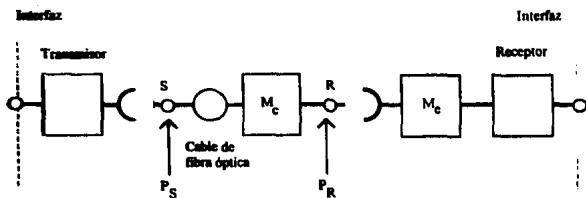


Figura 7.12 El margen de seguridad que se recomienda para los enlaces ópticos es de 6 dB

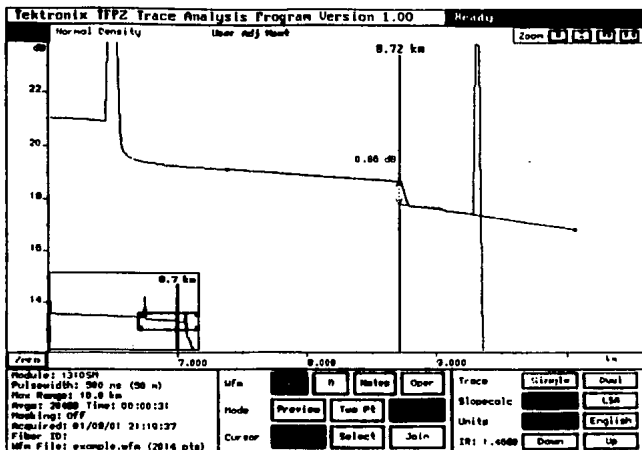


Figura 7.13 Los instrumentos de reflectometría dan gráficas de este tipo para la atenuación del sistema

DISEÑO DEL ENLACE

8. INSTALACION Y PRUEBAS

8.1 TIPOS DE INSTALACIONES DE FIBRAS OPTICAS

Los cables de fibras ópticas por su tamaño y peso permiten ser colocados en grandes longitudes. Las técnicas usadas para la instalación son similares a la de los cables convencionales, pero se requieren de precauciones especiales durante su instalación con el fin de minimizar los esfuerzos de tensión. Se consideran principalmente cinco tipos de instalaciones de cable óptico:

1. Instalación en ductos subterráneos
2. Instalación directamente enterrado
3. Instalación aérea
4. Instalación submarina
5. Instalación en interiores

8.1.1 Instalación en ductos subterráneos

La mayor parte del cable óptico que es usado para comunicaciones de larga distancia se encuentra en ductos subterráneos lo cual se debe a que así, se aprovecha la red de ductos ya instalados para cables de cobre. También se pueden manejar ambos tipos de cables.

En este tipo de instalación se deben tener ciertos cuidados antes de iniciar su operación. Los planos de la ruta a instalar deben ser revisados, verificando las condiciones del terreno, el número de pozos, y las distancias entre estos. Los pozos deben ser inspeccionados para comprobar que se encuentren en condiciones de trabajo. La trayectoria que siga el cable óptico se debe encontrar libre de obstáculos en los ductos. Para la instalación se requiere de recursos humanos, vehículos protecciones y equipo de comunicación.

Es importante comprobar que el número de carretes de cable, el número de fibras, la longitud del cable correspondan al cable que debe ser instalado. Se deben tener los siguientes cuidados sobre la bobina o carrete de cable a utilizar para conservar las propiedades del cable a ser instalado:

INSTALACION Y PRUEBAS

- Nunca debe dejarse caer el carrete o acostarlo.
- No debe rodarse el carrete para transportarlo, únicamente pequeños movimientos en el sitio de instalación en cuyo caso se debe seguir el sentido de rodamiento que indica la flecha en el carrete.
- No deben retirarse las tablas de protección del carrete hasta que comience la operación.

8.1.2 Instalación directamente enterrado

Antes de iniciar los trabajos de construcción debe ser revisada la ruta propuesta para el cable enterrado. De esta manera se localizarán puentes, curvas, cables de energía enterrados, tuberías de gas y agua y de otros cables telefónicos enterrados así mismo como sus profundidades. La localización de las cajas y puntos de empalme deben definirse por adelantado. Los puntos de empalme deben determinarse de tal forma que el trabajo de unión se realice en la superficie y dejando una cantidad suficiente de cable para hacer una espira en las cajas de empalme. Otro punto a considerar son las condiciones del suelo a lo largo de la ruta del cable con el fin de seleccionar la maquinaria y equipo para realizar la obra.

Las operaciones fundamentales en la instalación de cables directamente enterrados son: la apertura, la colocación del cable y el cerrado de la zanja y es recomendable utilizar maquinaria excavadora. Se debe evitar que el cable se dañe al colocarse en la trinchera y no exceder los radios mínimos de curvatura. Durante la operación de enterrado del cable, se vigilará que no se produzcan obstrucciones, que la alimentación sea continua y que se mantenga la profundidad adecuada.

Con el fin de evitar tensiones excesivas sobre el cable, la operación de excavado deberá de ser a la velocidad más baja posible y lubricando el eje de la bobina para que esta gire libremente. También es importante al tender el cable mediante el excavador, el evitar las curvas agudas, puesto que esto puede dañar las fibras dentro del cable aun no sufriendo ningún daño el cable exteriormente.

Cuando se levante el brazo de la maquinaria excavadora se hará en forma lenta y gradual, evitándose así un daño al cable al salir del surtidor. Se recomienda que la apertura de zanjas se haga mediante un método mecanizado reduciendo a un mínimo la excavación manual. El ancho de la zanja no deberá de ser mayor a los 10cm. con el fin de lograr una buena velocidad y eficiencia.

El cable al ser enterrado no debe tener contacto con rocas, piedras u objetos puntiagudos y pesados dentro de la zanja. Para esto, el fondo de la zanja se debe cubrir con tierra cernida o arena antes de colocar el cable y después de colocado también cubrir varios centímetros con tierra cernida o arena antes de rellenar la zanja. Los cables ópticos se instalan normalmente a una profundidad de 0.6 a 0.9 metros. Después de haber sido instalado el cable este deberá de probarse para verificar que no exista ningún daño en el mismo.

8.1.3 Instalación aérea

Existen dos tipos de cables para usarse en instalaciones aéreas, el cable óptico autoportado y el cable óptico para sujetarse a un alambre de suspensión externo. Los cables ópticos autoportados pueden ser instalados usando los métodos para instalar los cables de cobre convencionales pero siempre respetando el diámetro mínimo de curvatura del cable, el cual es especificado por el fabricante. Antes de hacer la instalación se deben considerar los esfuerzos mecánicos a que se someterá el cable y asegurarse de que no sobrepasen a los especificados por el fabricante. Si las condiciones del terreno lo permiten, se monta el carrete del cable en un camión y se desenrolla a lo largo de la línea de postes. El cable se jala del carrete y se coloca sobre poleas localizadas en cada poste en el lugar donde finalmente el cable será sujetado. Si las condiciones del terreno no son favorables para el uso de vehículos, el cable será jalado en forma manual e instalado en los postes de manera similar. Para fijar el cable a los postes se usan sujetadores de acero galvanizado de un tamaño que permita adaptarse a la guía de suspensión. Cuando es usada una guía de suspensión no metálica se requiere de sujetadores especialmente diseñados para no dañar a la guía. La utilización de alambres de suspensión externos ofrece algunas ventajas, por ejemplo puede instalarse el alambre de suspensión por adelantado. El cable óptico se une a la guía externa mediante un fleje no metálico. El uso de flejes no metálicos es un método rápido y se aplica mediante un equipo atador.

8.1.4 Instalación submarina

La instalación de este tipo de cable requiere de una planeación especializada. Se requiere de una inspección física de la ruta y se realiza un mapa del fondo submarino. La ruta es marcada mediante boyas, y se tiende un cable para facilitar el seguimiento durante la instalación. Antes de la instalación se deben realizar pruebas para localizar obstáculos, investigar la densidad de la tierra en el fondo y el comportamiento de las mareas.

INSTALACION Y PRUEBAS

Para la instalación es usado un arado que contiene un dispositivo que arroja agua a presión con el fin de que el arado penetre fácilmente. El cable se alimenta a través de un brazo suministrador de cable.

8.1.5 Instalación en interiores

En los cables ópticos para interiores se recomienda que contengan una cubierta externa de material retardante al fuego como el PVC o poliuretanos. Los cables ópticos en las centrales telefónicas generalmente se instalan sobre charolas o dentro de ductos para tal fin. Debe planearse la ruta de los mismos con el fin de evitar que fuerzas corten las fibras ópticas. Cuando los cables cruzan distintos niveles, y para no exceder la máxima carga de tensión del cable al bajar verticalmente, el cable debe ser sujetado. Esta sujeción se deberá de hacer con material suave que no dañe el cable.



**FIBRAS OPTICAS
CABLES AEREOS
PARA LARGA DISTANCIA**

TELESPAN DS



DESCRIPCION:

- Elemento de tracción dieléctrico
- Fibras ópticas de dispersión comoda, identificadas por color
- Tubo termoplástico o relleno con compuesto resistente a la humedad
- Cinta e hilos de material no higroscópico

- Cubierta interna de polietileno
- Capón de ruptura
- Rejunta textil
- Cubierta de polietileno en color negro

ESPECIFICACIONES:

CONDUMEX FO TELESPAN 69 DS 92

Peso Kg/Km	Diámetro exterior total	Tensión máxima	Radio mínimo de curvatura	Temperatura de operación	Longitud de empaque Carrete	Clase máxima*
130	13.5 mm	450 Kg	300 mm	-10 a 60°C	2100 m	100 m

No. de producto	No. de fibras	Atenuación máxima @ 1300 nm	Longitud de onda de corte	Diámetro del núcleo	Diámetro del revestimiento	Diámetro de la protección
690934	12	< 0.25 dB/km	1120-1350 nm	9 µm	125 µm	250 µm
690935	14					
690936	16					
690937	18					

TELESPAN DS



DESCRIPCION:

- Elemento de tracción dieléctrico
- Fibras ópticas de dispersión comoda, identificadas por color
- Tubo termoplástico o relleno con compuesto resistente a la humedad
- Cinta e hilos de material no higroscópico

- Cubierta interna de polietileno
- Capón de ruptura
- Rejunta textil
- Cubierta de polietileno en color negro

ESPECIFICACIONES:

CONDUMEX FO TELESPAN 69 DS 92

Peso Kg/Km	Diámetro exterior total	Tensión máxima	Radio mínimo de curvatura	Temperatura de operación	Longitud mínima de empaque Carrete	Clase máxima*
155	14.5 mm	450 Kg	300 mm	-10 a 60°C	2100 m	100 m

Número de producto	Número de fibras	Atenuación máxima @ 1550 nm	Longitud de onda de corte	Diámetro del núcleo	Diámetro del revestimiento	Diámetro de la protección
690945	24	< 0.25 dB/km	1120-1350 nm	9 µm	125 µm	250 µm
690946	26					
690947	28					
690948	30					
690949	32					
690950	34					
690951	36					

Figura 8.1 Características de cables aéreos para larga distancia

INSTALACION Y PRUEBAS



FIBRAS OPTICAS
PLANTA EXTERNA
CABLES DIELECTRICOS

HELITEL UM



DESCRIPCION:

- Elemento de tracción dieléctrico
- Fibras ópticas unimodo identificadas por color
- Tubo termoplástico relleno con compuesto resistente a la humedad
- Cinta e hilos de material no higroscópico

- Cubierta interna de polietileno
- Refuerzo textil
- Cubierta exterior de polietileno en color negro

ESPECIFICACIONES:

C CITT G 652
TELMEX EB 4-01

Peso kg/km	Diámetro exterior total	Tensión máxima (Aplicada sobre el elemento de tracción)	Impactos desde 15 cm (#/kg)	Resistencia a la compresión en 15 cm	Radio mínimo de curvatura	Temperatura de operación	Longitud de empaque Canete
120	13.0 mm	160 kg	20/6 00	650 kg	200 mm	-10 a 50°C	2100 m
No. de producto	No. de fibras	Atenuación máxima @ 1300 nm	Longitud de onda de corte	Diámetro del modo de propagación	Diámetro del núcleo	Diámetro del revestimiento	Diámetro de la protección
690085	8						
690449	10						
690470	12	0.50 dB/km	1130-1280 nm	9.5 ± 0.5 μm	8.3 μm	125 ± 3 μm	250 ± 15 μm
690491	14						
690551	16						
690572	18						

HELITEL MM 50 μm



DESCRIPCION:

- Elemento de tracción dieléctrico
- Fibras ópticas multimodo identificadas por color
- Tubo termoplástico relleno con compuesto resistente a la humedad
- Cinta e hilos de material no higroscópico

- Cubierta interna de polietileno
- Refuerzo textil
- Cubierta exterior de polietileno en color negro

ESPECIFICACIONES:

C CITT G 651
TELMEX EB 4-01

Peso kg/km	Diámetro exterior total	Tensión máxima (Aplicada sobre el elemento de tracción)	Impactos desde 15 cm (#/kg)	Resistencia a la compresión en 15 cm	Radio mínimo de curvatura	Temperatura de operación	Longitud de empaque Canete
120	13.0 mm	160 kg	20/6 00	650 kg	200 mm	-10 a 50°C	2100 m
No. de producto	No. de fibras	Atenuación máxima @ 850 nm	Apertura numérica	Ancho de bandas	Diámetro del núcleo	Diámetro del revestimiento	Diámetro de la protección
690435	8						
690456	10						
690477	12	3.0 dB/km	0.20 ± 0.015	400-600 MHz km	50 ± 3 μm	125 ± 3 μm	250 ± 15 μm
690498	14						
690558	16						
690579	18						

Figura 8.2 Características de cables para planta externa de alto número de fibras

8.2 CONSIDERACIONES Y CUIDADOS PARA UNA INSTALACION

PRUEBAS PARA GARANTIZAR UN ENLACE

8.2.1 Generalidades

La utilización de las fibras ópticas es posible gracias a las protecciones que se les aplican con el fin de confinarlas formando un cable. Los cables que regularmente son usados son los multifibras, aquellos de seis o más fibras ópticas. Dichos cables tienen un elemento central alrededor del cual se depositan o cablean las fibras ópticas, además se aplican cubiertas plásticas y frecuentemente una armadura de acero.

Las diferentes partes que conforman un cable no solamente son protecciones, sino también elementos para ser utilizados durante la instalación. En la instalación del cable de fibras ópticas se debe tener especial cuidado en los esfuerzos que esta puede sufrir debido a que las rutas no siempre son rectas. El elemento central o el núcleo de tracción debe tener la rigidez mecánica suficiente para soportar el peso del cable y las tensiones de instalación a lo largo de la longitud total del tramo de cable que se va a manejar. La cubierta exterior y los refuerzos también participan durante la tracción del cable puesto que de lo contrario los cables como las cubiertas podrían retraerse.

Cuando el elemento central del cable es metálico se le hace un bucle para sujetarlo con el cable de tracción. Esta operación se hace con un cable de acero el cual tiende a torcerse por lo que entre ambos cables se debe colocar un destorcedor que evite esfuerzos adicionales en el cable óptico.

Para sujetar la cubierta exterior se utiliza una malla metálica al cual se le suele llamar "Calcetín". Una vez aplicado el calcetín a este se sujeta también el núcleo de tracción y en su caso elementos de refuerzo mecánicos.

Tradicionalmente los ductos telefónicos han sido dimensionados a los máximos diámetros de los cables con conductores eléctricos de cobre. Tales diámetros se han estandarizado a 100 mm, contrastando con los 20 mm, que alcanzan los cables ópticos. Por tal motivo se ha hecho un sistema mediante el cual es posible aumentar la capacidad de las vías estandar. Esto consiste en introducir en el ducto tres tubos plásticos que se fijan entre dos pozos consecutivos mediante tapas en cada extremo de las mismas.

INSTALACION Y PRUEBAS

La operación de trifurcación de vías permite que donde pudo haber corrido un solo cable de cobre, se pueden instalar tres cables ópticos. Tomando en cuenta que un cable óptico rebasa la capacidad de los cables tradicionales de cobre se hace notar que, con el sistema descrito se hacen más eficientes y se aumenta la capacidad de las canalizaciones telefónicas.

Todos los cables de fibras ópticas se hacen en longitudes finitas. así es necesario unir un tramo con otro, con el fin de enlazar dos puntos distantes algunos kilómetros. Dicha unión requiere el uso de equipo especializado que permita un corte adecuado y la unión propia de las fibras ópticas.

El corte de las fibras ópticas debe hacerse perpendicularmente al eje de la misma, con un error menor a 3 grados. dicho corte generalmente se hace por fractura. se debe poner también especial interés en las partículas de polvo, grasa y agua que son comparables con las dimensiones del núcleo de la fibra óptica.

Previo a la unión de las fibras ópticas deben alinearse en los ejes x, y, z, incluyendo una rotación con respecto al eje de las mismas. Para tal efecto el equipo deberá de permitir estos grados de libertad por lo menos en una de las fibras ópticas en tanto que la otra deberá tener como mínimo el movimiento del eje z, colineal con el eje de la fibra óptica. Los ajustes en estos movimientos son micrométricos debido a las dimensiones de las fibras.

La unión permanente de las fibras ópticas se logra por fusión del material que las forma. Los métodos más comunes para lograr la fusión son la microflama de gas y un arco eléctrico. El primero es más delicado, tanto en la pureza de los gases como en el sistema de aplicación. El arco eléctrico es muy común y más sencillo de realizar así como más limpio.

Alineadas las fibras ópticas y estando separadas aproximadamente 100 micras se aplica una primera descarga o prefusión la cual limpia y acondiciona las fibras. Posteriormente se acercan a tope y se inicia la descarga para la fusión. Cada una de las etapas de prefusión, avance y fusión requieren un control adecuado de los tiempos de duración que son del orden de las décimas de segundo.

Para el caso de empalmes de tipo mecánicos la alineación y evaluación se recomienda que sean hechos con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR). Previo a la alineación, se coloca el OTDR en el extremo lejano de uno de los cables a empalmar.

Esto permite verificar la longitud total y posicionar el cursor del OTDR en el punto de empalme, precisamente antes de alinear. Una vez realizado el empalme el curso permite ubicar este aun en el caso de lograr un valor muy bajo de atenuación en la unión. El trazo del OTDR en el punto de empalme es por lo general un pequeño escalón cuyo tamaño indica la pérdida de la unión.

Los cables ópticos son generalmente herméticos, para mayor seguridad de las fibras ópticas. Sin embargo para realizar la unión de dos tramos es necesario tener las fibras ópticas al descubierto. Por tal motivo es necesario protegerlas en el punto de empalme y la solución es tener una envolvente que incluya tanto a los empalmes de las fibras ópticas como una sección de ambos cables. Dicho envolvente es conocido como Cierre de Empalme. Dicho cierre es necesariamente hermético en su totalidad y en particular alrededor de los cables. Dentro del cierre hay generalmente una o más charolas u organizadores donde se distribuyen los excesos de fibra óptica y se dejan y protegen los empalmes. Tales excesos en longitud son de uno a dos metros por fibra, por cable. Esto se hace a fin de poder trasladar el empalme de las fibras ópticas desde el equipo de fusión hasta el organizador. Adicionalmente se tiene con esto una longitud de reserva para el caso en que se requiera intervenir el empalme, lo cual es común para casos de localización de fallas y modificaciones en los enlaces. Evidentemente se debe verificar la operación del cable óptico en un enlace. Se debe ver con un OTDR la longitud total del enlace y como el OTDR puede medir también la atenuación de esa longitud queda así una primera evaluación. Pero es recomendable verificar además en ambas direcciones y obtener los promedios de las lecturas.

Para realizar los empalmes entre tramos, pueden hacerse las mediciones con la fibra desnuda en los extremos del enlace. Para llegar a los equipos de transmisión y recepción, es necesario conectar o rematar el cable con cables terminales llamados Pig-tails. Estos remates son cables cortos de 3, 5, 10, 15 m y en su extremo llevan aplicados los conectores. Antes de conectar los cables terminales, se pueden realizar pruebas de atenuación. Una vez empalmados los cables terminales e instalados con sus conectores respectivos, el empleo de un OTDR se dificultará por las reflexiones inherentes en la unión a través del conector. En este caso, las mediciones de atenuación deben hacerse con una fuente estabilizadora de luz, un tramo de referencia y un medidor de potencia. Otra limitación al uso del OTDR es para el caso de un enlace de gran longitud. En estos casos se podría rebasar el rango dinámico del reflectómetro, ya que se requiere que el pulso viaje hasta el extremo del enlace y retorne al instrumento. Esto significa un doble recorrido del cable, con la consecuente doble energía requerida o pérdida resultante.

8.2.2 Protocolo de Instalaciones

Un Protocolo de Instalaciones es una serie de pasos y recomendaciones para lograr una buena instalación de los cables de fibras ópticas y está compuesto por:

1. Planificación e Ingeniería del proyecto.
2. Limpieza, verificación y guiado de la vía.
3. Instalación de flexoductos y tapas.
4. Guiado de flexoductos para instalación de cable.
5. Instalación del cable.
6. Acomodo y fijación del cable.
7. Empalmes rectos, terminales y pruebas a cable instalado.
8. Pruebas finales.

8.2.2.1 Planificación e Ingeniería del proyecto

El primer paso que se debe dar en la instalación del cable óptico es la adquisición de los planos de la ruta. Se debe hacer un análisis de estos planos y así se proponen los puntos de empalme. Se deben localizar los puntos que son críticos de la ruta como desniveles, cambios de dirección y la longitud de suministro del cable. Se deben localizar áreas que presente ciertas dificultades como avenidas con elevado índice de tránsito, parques, cruces de avenidas, registros en el arroyo, y los accesos a la canalización o ruta. Se efectúa posteriormente una visita física a los registros y a la ruta para verificar las condiciones en las cuales se encuentran los registros, al mismo tiempo que se asigna la vía seleccionada para el cable óptico. Se verifican las dimensiones de cada uno de los registros para así tener información certera para que, cuando se efectúe la asignación final y definitiva de los sitios donde se harán los empalmes se pueda determinar el exceso de cable que debe considerarse para la instalación.

Una vez que han sido dimensionados todos los registros se selecciona el que se considere adecuado para efectuar el empalme. En cada registro de empalme se debe acumular una longitud de cable de 15 m de cada punta (un total de 30 m). En las paredes del registro se acomoda dicho exceso, el cual es una reserva de cable como medida preventiva para movimiento del cable en los casos de reparaciones a éste. Es importante antes de verificar y limpiar los ductos analizar la trayectoria de la ruta para programar el trabajo en días y horas no hábiles además de establecer medidas de seguridad tanto para el personal, los peatones y el tránsito de vehículos.

8.2.2.2 Limpieza, verificación y guiado de la vía

Las operaciones de verificación, limpieza y guiado se realizan en un solo paso. Se usa un dispositivo metálico como verificador del ducto que tiene un diámetro muy semejante al de este. La limpieza del ducto se efectúa con un elemento cilíndrico que contiene cerdas de acero, el cual elimina las rebabas de concreto en el interior de este.

Finalmente esta aunada a los dispositivos de verificación y limpieza, lo que será la guía de hilo de algodón, poliéster, nylon o acero galvanizado. Es necesario mencionar que el inicio de toda esta operación se efectúa con una guía de fibra de vidrio, la cual se inserta en la vía seleccionada en forma manual.



Figura 8.3 Dibujo de los ductos en una instalación subterránea

8.2.2.3 Instalación de flexoductos y tapas

Un Flexoducto es un material termoplástico protegido contra agentes químicos y el cual actúa como ducto del cable óptico. Con la finalidad de incrementar la capacidad de los ductos de concreto de la red, se reúnen tres flexoductos que son alojados en la vía seleccionada para la disposición del cable. De esta manera, se triplica la capacidad de la vía correspondiente y además se protege al cable de algún posible daño, al efectuar la inmersión del cable, ocasionado por pequeñas rebabas de concreto contenidas en el interior del ducto que no fueran eliminadas en la operación de limpieza del mismo.

Las Tapas consisten en bridas de material Termoplástico que son colocadas en las entradas y las salidas de la vía que contiene los flexoductos en los registros, con la finalidad de mantenerlos fijos en una sola posición. La Metodología para la instalación de los Flexoductos y la colocación de tapas y avellanado de flexoducto se indica a continuación:

- Antes de la inmersión de los flexoductos se debe efectuar un análisis de la trayectoria de la ruta en el área donde se efectuará la inmersión y se deberán tomar las medidas de seguridad tanto para el personal, los peatones y el tránsito, colocando señales como fantasmas, anuncios de hombres trabajando, precaución. Se debe asegurar que se ha efectuado la correcta limpieza del ducto.
- Efectuar el montaje de los flexoductos en carretes y colocarlos en el remolque o gatos correspondientes.
- Identificar la vía por lo que se efectuará la inmersión, verificando que en ella se localiza la guía.
- Si el tendido de los flexoductos se efectúa usando equipo mecanizado, se debe colocar un malacate en el registro que previamente se haya seleccionado y debe anclarse de tal forma que resista, sin desplazarse, la tensión que se presente al jalado de los flexoductos.
- Los carretes de flexoductos deben colocarse en el registro en el extremo opuesto al malacate. Si el tendido de los flexoductos se hace en forma manual se coloca personal en cada pozo para que el jalado sea más uniforme.
- Atar la punta de flexoductos a la guía instalada en la vía seleccionada.
- Se procede al jalado de los flexoductos.
- Una vez terminada la inmersión completa del flexoducto, se deben cortar estos al ras de la salida y entrada de la vía en cada uno de los pozos, iniciando esta operación en la punta externa y después en la interna.
- Proceder a la colocación de las tapas tanto a la entrada como a la salida de los flexoductos en los registros.

- Finalmente es necesario matar los fillos en donde fueron cortados los flexoductos, en todos los registros, para evitar daños en el cable cuando se disponga a la inmersión de éste.

8.2.2.4 Guiado de flexoductos para instalación de cable

Esta operación es muy parecida a la etapa de guiado en la vía seleccionada para la instalación de los flexoductos. La verificación, limpieza e instalación de la guía en el flexoducto seleccionado para la inmersión del cable se efectúa en un solo paso. Para esto se utiliza un dispositivo compuesto por un elemento cilíndrico de material esponjoso o plástico que tiene un diámetro muy semejante al del flexoducto, el cual cubre aproximadamente un 85% del área interior del mismo. A este elemento aunada la guía que es de algodón, poliéster, nylon o acero galvanizado. En este caso también el inicio de toda la operación se efectúa con una guía de fibra de vidrio de 200 m de longitud la cual se inserta en el flexoducto seleccionado en forma manual.

8.2.2.5 Instalación del cable

Para la instalación de cables ópticos en ductos subterráneos, de manera segura y confiable, se deben seguir los procedimientos y requisitos listados a continuación:

Preparativos anteriores a la inmersión:

- Considerar el análisis de la trayectoria de la ruta, efectuado anteriormente.
- Tomar las medidas de seguridad necesarias, para el personal, los peatones y el tránsito.
- Motivar al personal al cumplimiento de las reglas de seguridad y el manejo adecuado del cable.
- Identificar el flexoducto por el cual se instalará el cable en cada registro.
- El carrete del cable debe montarse en un remolque o gatos desenrolladores.
- Si existen cambios de dirección en la ruta del cable, este debe desenrollarse del carrete y formar una figura de ocho sobre el piso para seguir efectuando la inmersión.
- La terminal externa de los tramos de cables en cada carrete debe tener un fusible destorcedor así como el dispositivo de tracción que sujetará tanto la cubierta poliacero como el kevlar.
- Para el flexoducto en el cual se instalará el cable, las salidas y las entradas, deben estar aboquilladas.
- En todos los registros debe considerarse anclas de impacto y cinturones de nylon en las paredes para soportar el cable.

INSTALACION Y PRUEBAS

Procedimiento de instalación

- Colocar el equipo, dispositivos y materiales en los lugares previamente establecidos, incluyendo los de protección y señalización externa.
- Deberá distribuirse el personal a lo largo de la trayectoria del cable por instalar (en los extremos y en los registros intermedios), para que se vigile la instalación, con el fin de evitar posibles daños por roce del cable.
- Serán colocados el destorcedor metálico embalado y un fusible de 100 Kg. unidos al dispositivo de tracción del cable.
- Durante la instalación el porta carrete y el cable estarán ubicados aproximadamente en la parte intermedia de la longitud total del tramo a instalar, que es de 2 Km.
- Se instalará el cable en un sentido y al llegar a un punto de empalme el complemento de este carrete se desenrolla, depositándolo en el piso. se forman ochos hasta que la punta interna quede libre. Los ochos serán de longitud entre 8 y 10 m de diámetro, tal que se respete el diámetro mínimo de curvatura del cable.
- Se colocan pernos de acero en los muros de los registros para fijar de manera distribuida cinturones de nylon. Se emplea la pistola de fijación de pernos, debiéndose tener precaución que los pernos no reboten contra las varillas de acero que forman las paredes del registro. Los cinturones de nylon servirán para sujetar al cable.
- Se mantendrá equipo adecuado, en la zona del carrete y en los registros intermedios.
- Cuando existan cambios de dirección, será necesario cuidar extremadamente el cable que los radios de curvatura sean lo mas amplios posibles, y así evitar que el cable se dañe durante la instalación.
- Antes de iniciar la instalación del cable, habrá que realizar una inspección final a toda la instalación, pozos y estado del cable.
- Se dispondrá de personal en la ubicación del carrete para ayudar a que este gire durante la instalación.
- Se inicia el jalado en forma manual a indicaciones del supervisor, utilizando el sistema de comunicación.
- Si la inmersión del cable es interrumpida, al volver a empezar la aceleración será gradual para evitar que se presenten tensiones elevadas.
- En cada registro destinado a un empalme se deberán dejar 15 m de exceso de longitud en cada punta de los dos cables. Ambas puntas serán enrolladas en forma conjunta y colocadas en las paredes del registro mediante herrajes de sujeción.
- Una vez que se ha terminado la instalación de un tramo de cable, es conveniente colocar un tapón termocontractil en su punta para evitar que la humedad penetre al mismo.

8.2.2.6 Acomodo y fijación del cable

Para la realización de esta actividad se recomienda que el acomodo y sujeción del cable sean en la parte superior de los registros. Esto es con el fin de protegerlo de maltratos de personas que efectúen otros trabajos en los registros por donde se instalará el cable de fibra óptica.

Esta operación se recomienda se efectúe en forma simultánea con la inmersión del cable para evitar cualquier tensión adicional que pudiera maltratar el cable.



Figura 8.4 Carretes para transportar los cables de fibra óptica para su instalación

8.2.2.7 Empalmes rectos, terminales y pruebas a cable instalado

Una vez que se ha efectuado la inmersión de dos o más tramos de cable se procede a efectuar las pruebas al cable y a cada una de las fibras para verificar si no sufrieron algún maltrato que haya ocasionado un incremento considerable en la atenuación o bien que haya sufrido rotura alguna de ellas.

INSTALACION Y PRUEBAS

Procedimiento:

- Acondicionar el vehículo en el cual se efectuarán las pruebas, asegurándose del continuo suministro de energía eléctrica para los equipos e iluminación.
- Se procede a preparar las puntas de los cables en el punto donde se efectuará el empalme. Esta operación consiste en lo siguiente: desprender cubierta polyacero, kevlar, cubierta interna y mylar, hasta que los tubos que contienen a las fibras queden en libertad. Después será necesario cortar los tubos cuidadosamente de tal forma que no se fracturen las fibras. Después se procede a quitar la protección primaria de la fibra con herramientas especiales. También se efectúa un corte perfectamente perpendicular a la misma.
- Se efectúa la medición de todas las fibras en ambos cables conectando estas al equipo OTDR, el cual nos proporciona la información de la longitud y la atenuación de la fibra en dB.
- Se coloca el equipo OTDR en alguna de las puntas lejanas de alguno de los dos cables. Dicha punta se prepara mediante el procedimiento antes expuesto. Esto se hace con el propósito de realizar las mediciones cuando se están efectuando los empalmes de las fibras. Se debe acondicionar el vehículo en el cual se efectuarán las mediciones.
- Se establece comunicación entre el punto de empalme y el punto de prueba a través de diademas que se conectan a una batería y a la armadura y el núcleo del cable que es por donde se establece dicha comunicación. También existe la posibilidad de usar teléfonos ópticos
- Se procede a iniciar el empalme de las fibras con una continua comunicación entre los operadores del OTDR y del equipo empalmador, de tal forma que el empalme que presente las mejores características de atenuación sea el que quede en forma definitiva en la unión de cada una de las fibras.
- Se procede a efectuar el cierre de empalme una vez que han sido empalmadas y colocadas en el organizador todas las fibras.
- Una vez que se han realizado todos los empalmes intermedios se procede a realizar los empalmes terminales. Estos consisten en unir las fibras contenidas en el cable instalado con los cables terminales (Pig-tails). El procedimiento para la realización de los empalmes terminales es similar al de los empalmes rectos, antes descrito.

8.2.2.8 Pruebas finales

Una vez concluida la realización de empalmes rectos y terminales en todo el enlace, se procede a efectuar las pruebas finales del sistema, para lo cual es necesario efectuar previamente las siguientes actividades:

- Definir por parte del proveedor de los equipos, el sitio en el cual se instalarán los equipos a los cuales se conectarán las fibras ópticas.
- Definir como se alojará el cable dentro de la central telefónica y efectuar de esta manera los preparativos correspondientes para su instalación.
- Efectuar el acomodo y fijación del cable dentro de la central telefónica.
- Previo a la realización de las pruebas finales, se debe seguir y guardar las recomendaciones de seguridad.
- Acondicionar el sitio en el cual se efectuarán las pruebas en las centrales telefónicas, asegurándose del continuo suministro de energía eléctrica a los equipos e iluminación.
- Se conecta el cable terminal al equipo OTDR en la central donde se efectuará la prueba y se determina la atenuación total del sistema. esta operación se efectúa con cada una de las fibras, en ambos extremos del sistema.
- Se establece comunicación con el otro extremo del enlace para informarse mutuamente de los valores obtenidos.
- Se obtienen las gráficas de cada una de las fibras mediante un equipo impresor. En ellas se representa la atenuación total del sistema, así como la longitud de la fibra.
- Con el propósito de tener la máxima exactitud en la caracterización de la atenuación de las fibras en todo el sistema, se efectúa una prueba mas, pero desde el extremo opuesto.
- La manera adecuada de reportar los valores finales para cada fibra, es con el promedio del valor absoluto de las dos lecturas (extremos opuestos).
- El cable está listo para efectuar el enlace.



Figura B.5 Sitio donde se conectan los equipos de línea

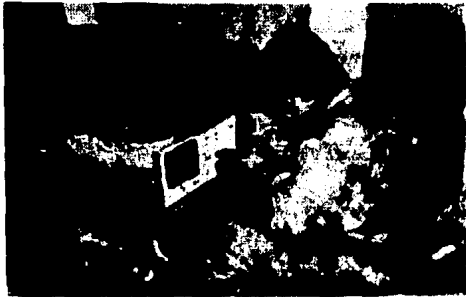


Figura 8.6 Mediciones y pruebas finales para garantizar el enlace



Figura 8.7 Cable de fibra óptica formando figuras de ocho cuidando el diámetro mínimo de curvatura

8.3 EQUIPOS DE MEDICION

8.3.1 Introducción

La magnitud física que se usa para determinar las mediciones ópticas en una fibra óptica es la potencia, esta se define como el trabajo ejercido para realizar una función en un tiempo determinado, cuyas unidades son Joules/seg= Watt

$$P = \frac{dW}{dT} \quad (8.1)$$

Al introducir una haz de luz con una potencia luminica P_0 en una fibra, ésta se atenúa en el trayecto obteniendo en el otro extremo una potencia luminica P_1 , de donde esta atenuación se mide en decibeles.

$$\alpha(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (8.2)$$

$$P(dBm) = 10 \log_{10} \frac{P_1}{1mW} \quad (8.3)$$

8.3.2 Medidas de retrodispersión

En la verificación de un enlace óptico, se utiliza el método de pérdidas por inserción para medir atenuación. Mediante este método, sin embargo, no se pueden establecer, por ejemplo, localización de fallas, uniones defectuosas u optimizar empalmes y conectores; aspectos que si pueden determinarse con el uso de un Reflectómetro. Es por esto que el uso de este equipo es esencial en los trabajos de fabricación, instalación y mantenimiento de fibras ópticas. El principio básico del Reflectómetro es que un pulso de luz se inyecta en la fibra bajo prueba mediante un acoplador "Y". El acoplador se utiliza para inyectar el pulso en la fibra, recibir la energía retrodispersada, separarla y dirigirla a un detector fotosensible en el otro extremo acoplador.

La señal retrodispersada se detecta, procesa y se presenta en la pantalla. La señal de retrodispersión proporciona una imagen completa del enlace bajo prueba, ya que presenta aspectos diversos del mismo, tales como detectar: reflexiones de Fresnel debidas a fracturas, la existencia de empalmes o conectores y su ubicación, y determinar la curva de atenuación del pulso debida a la dispersión de Rayleigh. Para facilitar las mediciones y la interpretación de los resultados las señales se presentan logarítmicamente. Una señal luminosa en una fibra óptica es atenuada debido a dos mecanismos: Pérdidas por absorción cuyas causas son las impurezas en el material de la fibra, la presencia de radicales OH y Iones metálicos; las pérdidas por dispersión que son causadas por la dispersión de Rayleigh, y la dispersión estructural debida a las imperfecciones de la fibra óptica (microcurvaturas).

8.3.3 Mediciones en cable de fibra óptica

8.3.3.1 Atenuación

La técnica de reflectometría (Backscattering) es un procedimiento para medir la atenuación de un cable de fibra óptica monomodo. La técnica puede aplicarse para verificar la continuidad óptica, defectos físicos, empalmes, la retrodispersión de la luz y la longitud de la fibra. Las condiciones para el acoplamiento son de que el rayo de acoplamiento debe ser coaxialmente incidente con el de la fibra; varios dispositivos pueden usarse para reducir las reflexiones de Fresnel, por ejemplo materiales acopladores de índice de refracción. las pérdidas de acoplamiento deben minimizarse.

8.3.3.2 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo

Consideraciones generales

El nivel de señal óptica reflejada, es normalmente pequeña y cercana al nivel de ruido. Para mejorar la relación señal-ruido y el rango de medición dinámico es usual utilizar una fuente de luz de alta potencia en conjunto con un procesador de señal para la señal detectada. Además, para mejorar la resolución se necesita disponer de un ajuste del ancho del pulso. debe tomarse especial cuidado para minimizar las reflexiones de Fresnel, y evitar la propagación de modos de orden superior. En el caso en que la fibra a medir no tenga conector se requerirá de un tramo de fibra

INSTALACION Y PRUEBAS

óptica con características similares a la de la fibra que se desea medir. El tramo de fibra deberá de tener instalado en uno de sus extremos un conector óptico compatible con el conector que tenga el equipo de medición a emplear, el otro extremo del tramo de la fibra deberá presentar la fibra desnuda y con un corte transversal correctamente realizado, de manera que permita la correcta unión mecánica de esta con la fibra a medir.

El Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) deberá de tener las siguientes características:

Longitud de onda:	1.5 μm
Tipo de fibra:	Unimodo
Salida óptica (entrada a la fibra):	< 1mW
Conector óptico:	Tipo FC
Gama de medición (longitud):	200 Km
Gama de operación	0 a 40 Grados Centígrados

Procedimiento de medición

Se prepara el extremo elegido de la fibra, removiendo todas sus capas protectoras y realizando el corte transversal con los dispositivos correspondientes. Se une la fibra a medir con el tramo de fibra que contiene en su otro extremo el conector correspondiente (la unión de esas dos fibras se puede realizar mecánicamente o por fusión).

Una vez realizada la unión entre la fibra a medir y el tramo de la fibra se conecta este último al reflectómetro óptico y se procede a realizar las mediciones necesarias de acuerdo a los procedimientos indicados en los manuales del equipo de medición correspondiente.

El análisis completo de la curva registrada, muestra que, independientemente de la medición de atenuación, muchos fenómenos pueden monitorearse usando la técnica de reflectometría, por ejemplo:

- Reflexiones originadas por el dispositivo acoplador a la entrada de la fibra.
- Zonas de pendiente constante.
- Discontinuidad debido a efectos locales, empalmes o acopladores.
- Reflexiones debidos a defectos dieléctricos.

- Reflexiones en el final de la fibra.
- Distancias

8.3.4 Medición de atenuación de empalmes

8.3.4.1 Método de promedio bidireccional con OTDR

El empalme se usa para unir permanentemente una fibra óptica con otra. Las técnicas básicas son las de fundir las dos fibras y la de pegarlas en una estructura alineada. el pegado puede ser mediante un adhesivo o por presión mecánica o por combinación de ellas. Cuando se usa un OTDR para medir pérdidas en empalmes es crítico usar un promedio bidireccional, ya que de otra manera se obtendrían datos que pueden ser ficticios. Una de las razones que falsean cuando se usa en una sola dirección es la diferencia entre los diámetros de los núcleos.

La pérdida en un empalme debida solo a la diferencia entre los diámetros de las fibras esta dado por:

$$\alpha = 20 \log_{10} [0.5(W1/W2 + W2/W1)] \quad (8.4)$$

donde:

W1 = diámetro del núcleo de la fibra 1

W2 = diámetro del núcleo de la fibra 2

8.3.4.2 Método de corte de referencia (Cut-Back)

Principalmente, la prueba mide la potencia a través de una longitud de fibra. en seguida la fibra es cortada a dos metros y se procede a medir de nuevo la potencia, la diferencia de las lecturas es la pérdida del empalme.

$$\alpha_{FO(dB/km)} = \frac{10}{L_1 - L_2} \text{Log} \frac{P_{SAL2}}{P_{SAL1}} \quad (8.5)$$

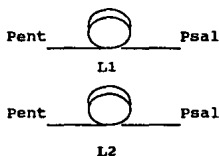


Figura 2.9 Método de Corte de Referencia

2.3.5 Mediciones en Pig-Tails y Jumpers

Los Pig-Tails son cables flexibles de fibra óptica con conector en un solo extremo, a diferencia de los jumpers que tienen conector en ambos lados. Para medir las pérdidas por insertar un pig-tail o un jumper se toma un jumper de referencia y se conecta entre una fuente y un detector, la potencia detectada se toma como referencia cero.

Posteriormente se inserta el pig-tail o el jumper que se desea caracterizar entre el jumper de referencia y el detector. la nueva lectura que se obtienen en este arreglo se resta de la lectura anterior dándonos el valor de la pérdida de inserción

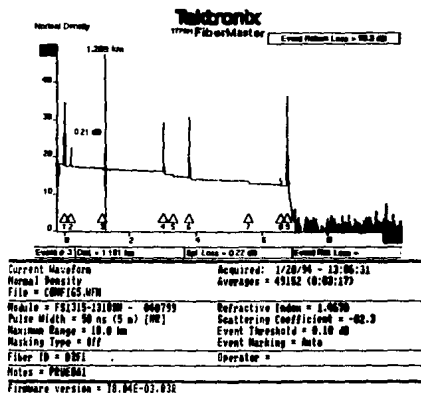
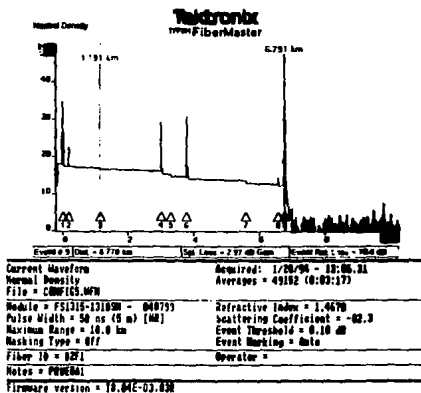


Figura 8.9 Información de atenuación que proporciona un OTDR y la gráfica que presenta

INSTALACION Y PRUEBAS

3:50:01 PM, Friday, January 21, 1990

Event #	Distance (km)	Splice Loss (dB)	Event Det. Loss (dB)	Fiber Loss (dB/km)	Two Point Distance (km)	Two Point Loss (dB)	Link Loss from event (dB)
1	0.000	0.45	32.6	-	-	-	-
2	0.193	0.18	36.3	0.066	0.190	0.56	0.56
3	1.191	0.22	-	0.230	0.997	0.52	1.07
4	2.300	0.76	29.4	-	1.797	0.52	1.90
5	3.297	0.47	-	0.311	0.300	0.86	2.75
6	3.709	0.52	33.5	0.397	0.493	0.66	3.41
7	5.591	0.65	-	0.369	1.001	1.01	4.42
8	6.500	0.40	64.4	0.300	0.993	0.97	5.39
9	6.770	-2.97	10.4	0.190	0.190	0.42	6.01

Current Waveform Acquired: 1/20/90 - 13:06:31
Normal Density Averages = 49152 (0:09:17)
File = COM1CS.MWF

Module = FS1310-101000 - 000799 Refractive Index = 1.4670
Pulse Width = 90 ns (5 n) [NF] Event Threshold = 0.10 dB
Maximum Range = 10.0 km Event Marking = Auto
Masking Type = Off

Fiber ID = 02F1 Operator =
Notes = PVEB01
Firmware version = 10.04E-03.030

Figura 8.10 Tabla de los eventos que localiza automáticamente el equipo de medición

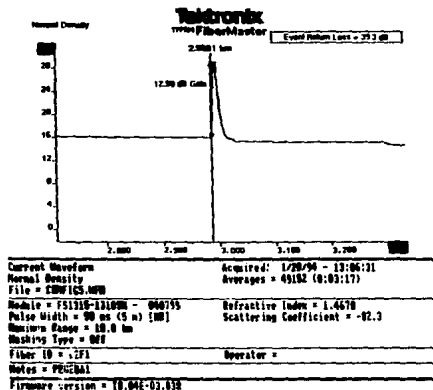


Figura 8.11 Localización de una pérdida reflectiva debido a un conector

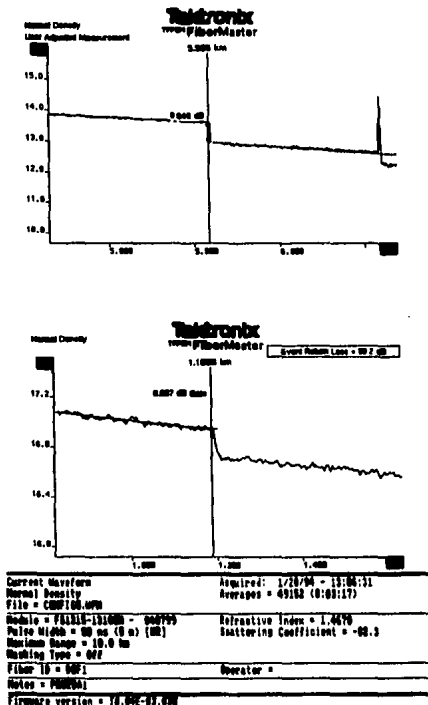


Figura 8.12 Localización de una pérdida no reflexiva debido a un empalme

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los conceptos básicos nos dan las herramientas necesarias para entender el comportamiento de los sistemas de comunicación. Proporcionan la base para determinar la capacidad del canal de comunicación, así como sus limitantes, y poder así diseñar y elegir el equipo más adecuado en cada caso. La aportación del muestreo de una señal analógica y transformarla en señal digital hace posible el incrementar la velocidad de transmisión de datos y su multiplexaje de una manera eficiente y confiable.

El desarrollo y perfeccionamiento de códigos para asegurar el contenido de la información permite detectar errores y asegura la mejor transmisión de la información y recepción.

La seguridad que dan las transmisiones PCM, por ser una tecnología madura de más de 30 años, proporcionan confiabilidad en la transmisión de los mensajes y su segura recuperación. Además de que con la nueva modulación delta adaptiva PCM se obtienen velocidades de transmisión mucho más altas.

En teoría los enlaces a nivel mundial presentan incompatibilidad por los diferentes estándares en cuanto a capacidades y velocidades de líneas, pero en la práctica, gracias al avance de los multiplexores que permiten efectuar sincronías en los enlaces de diferentes velocidades esto no sucede.

El rápido desarrollo de la fibra óptica la hacen muy competitiva en comparación con el cable trenzado y el cable coaxial, debido a la baja atenuación que ha alcanzado, llegando actualmente a 0.2 dB/Km y se pretende llegar hasta 0.16 dB/Km.

Asimismo es menor la cantidad de repetidores que se necesitan en un enlace de larga distancia, en comparación con un enlace convencional (cable coaxial o cable trenzado) utilizando fibra óptica monomodo. La fibra óptica como tal, tiene un ancho de banda prácticamente infinito, de varios GHz, por lo tanto el ancho de banda del sistema de enlace esta limitado únicamente por el equipo.

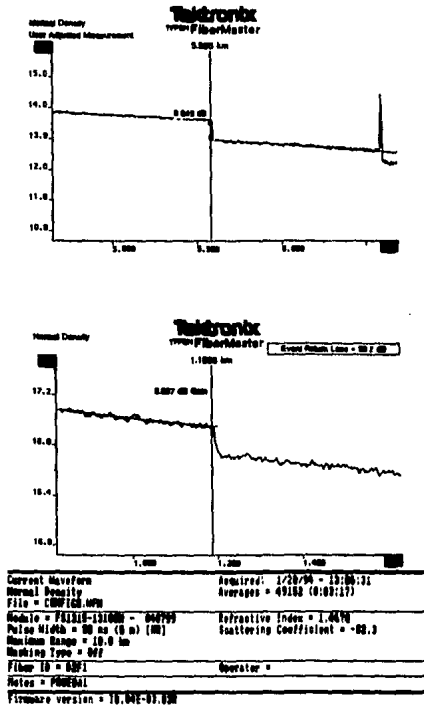


Figura 8.12 Localización de una pérdida no reflexiva debido a un empalme

INSTALACION Y PRUEBAS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los conceptos básicos nos dan las herramientas necesarias para entender el comportamiento de los sistemas de comunicación. Proporcionan la base para determinar la capacidad del canal de comunicación, así como sus limitantes, y poder así diseñar y elegir el equipo más adecuado en cada caso. La aportación del muestreo de una señal analógica y transformarla en señal digital hace posible el incrementar la velocidad de transmisión de datos y su multiplexaje de una manera eficiente y confiable.

El desarrollo y perfeccionamiento de códigos para asegurar el contenido de la información permite detectar errores y asegura la mejor transmisión de la información y recepción.

La seguridad que dan las transmisiones PCM, por ser una tecnología madura de más de 30 años, proporcionan confiabilidad en la transmisión de los mensajes y su segura recuperación. Además de que con la nueva modulación delta adaptiva PCM se obtienen velocidades de transmisión mucho más altas.

En teoría los enlaces a nivel mundial presentan incompatibilidad por los diferentes estándares en cuanto a capacidades y velocidades de líneas, pero en la práctica, gracias al avance de los multiplexores que permiten efectuar sincronías en los enlaces de diferentes velocidades esto no sucede.

El rápido desarrollo de la fibra óptica la hacen muy competitiva en comparación con el cable trenzado y el cable coaxial, debido a la baja atenuación que ha alcanzado, llegando actualmente a 0.2 dB/Km y se pretende llegar hasta 0.16 dB/Km.

Asimismo es menor la cantidad de repetidores que se necesitan en un enlace de larga distancia, en comparación con un enlace convencional (cable coaxial o cable trenzado) utilizando fibra óptica monomodo. La fibra óptica como tal, tiene un ancho de banda prácticamente infinito, de varios GHz, por lo tanto el ancho de banda del sistema de enlace esta limitado únicamente por el equipo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La adaptabilidad que presentan los enlaces de fibra óptica con los equipos ya existentes es muy alta, permitiendo aprovechar parte de la tecnología ya instalada reduciendo costos de inversión por un lado. Pero por otro, el utilizar enlaces con fibras monomodo para distancias cortas ha incrementado la instalación de atenuadores para evitar la saturación.

La fibra óptica como tal está estimulando el desarrollo e investigación de equipos con mayor velocidad y ancho de banda, así como, el desarrollo de materiales para fibras ópticas especiales, como es el caso de las fibras oscuras.

Debido a la demanda que presentan las poblaciones rurales, la fibra óptica es una gran alternativa para solucionar sus problemas de comunicación al conectarlos a través de un multiplexor.

RECOMENDACIONES

El diodo más adecuado para transmisiones de larga distancia es el diodo láser por la potencia de salida que maneja, que va de 1 miliwatt a 10 miliwatts a diferencia del LED cuya potencia de salida es de 100 microwatts a 1 miliwatt.

En el equipo receptor se recomienda utilizar un diodo APD debido a que su sensibilidad va de 10 a 15 dB arriba de un diodo *p-i-n*.

En los enlaces de larga distancia la fibra óptica monomodo es la más adecuada, mientras que la fibra multimodo tiene otras áreas de aplicación, como enlaces de corta distancia.

La atenuación que presentan las fibras ópticas a grandes distancias es muy baja, la de los empalmes de fusión se considera casi cero, pero se debe poner especial atención en el estudio de los conectores para mejorar su diseño tratando bajar su atenuación ya que actualmente se habla de 0.5 dB, siendo la mayor de todos los elementos que forman el enlace.

Se debe reconocer que las comunicaciones son la base de cualquier economía y son la base del desarrollo y bienestar de las sociedades. Es importante aclarar que las comunicaciones a larga distancia mediante fibras ópticas se complementan con otras tecnologías como lo son las transmisiones vía satélite.

GLOSARIO

1. **Absorción.** En una fibra óptica, es la porción de la atenuación resultante de la conversión de potencia óptica en calor.
2. **Acoplamiento modal.** En una fibra óptica el intercambio de potencia entre los modos. Este intercambio puede alcanzar un equilibrio estadístico después de propagarse la señal sobre una distancia finita llamada longitud de equilibrio.
3. **Ancho de banda.** Valor numérico correspondiente a la frecuencia mas baja para la cual la función de transferencia de la fibra decrece hasta una fracción especificada, normalmente al 50% del valor a frecuencia cero.
4. **Anchura espectral.** Medida de la extensión abarcada por una o varias líneas espectrales.
5. **Angulo de aceptación.** El semiángulo del vértice de cono dentro del cual la potencia inyectada en la fibra se acopla en modos guiados.
6. **Apertura numérica teórica máxima (AN_{tmax})** (para modos guiados). Raíz cuadrada de la diferencia de los cuadrados del índice máximo de refracción (n_1) del núcleo de la fibra y del índice de refracción (n_2) del revestimiento de la fibra.
7. **Atenuación.** La atenuación a una longitud de onda entre dos secciones transversales 1 y 2 de una fibra separadas por una distancia.
8. **Centro del núcleo.** Centro del menor círculo que puede contener la totalidad del núcleo.
9. **Centro de revestimiento.** Centro del menor círculo que define el centro del revestimiento.
10. **Conector.** Un dispositivo cuya misión es transferir potencia óptica entre dos fibras o dos haces de fibras, diseñado para poder ser conectado y desconectado repetidamente.
11. **Corriente de oscuridad.** La corriente exterior que bajo específicas condiciones de polarización, fluye en un detector fotosensible cuando no hay radiación incidente.
12. **Corriente de umbral.** La cota inferior de la corriente de polarización por encima de la cual la emisión del láser es de tipo estimulado mas que del tipo espontaneo.
13. **Desviación del diámetro de la superficie de referencia (DR).** Diferencia entre el cociente del diámetro de la superficie de referencia, DR entre el diámetro nominal recomendado de la superficie de referencia, DR_r , y la unidad, expresada en porcentaje.
14. **Desviación del diámetro de la superficie del revestimiento (DCL).** Diferencia entre el cociente del diámetro de la superficie del revestimiento, DCL el entre el diámetro nominal recomendado del revestimiento, DCL_r , y la unidad expresada en porcentaje.
15. **Desviación del diámetro del núcleo (ΔDC_0).** Diferencia entre el cociente del diámetro del núcleo, DC_0 y el diámetro nominal recomendado del núcleo, DC_{0r} , y la unidad, expresada en porcentaje.
16. **Detector óptico.** Transductor que genera una señal eléctrica cuando es irradiado por una señal óptica.

GLOSARIO

17. **Diámetro del núcleo.** Diámetro del círculo que define el centro del núcleo.
18. **Diodo emisor de luz (LED).** Un dispositivo a base de una unión PN de semiconductores que, por emisión espontánea, emite una radiación óptica incoherente mediante la inyección de electrones/huecos a través de la unión PN.
19. **Diodo láser de inyección.** Un dispositivo semiconductor láser, que emite radiación óptica por emisión estimulada en una unión PN dentro de una cavidad óptica resonante.
20. **Dispersión cromática.** Es en realidad un sinónimo redundante. (Se usa con frecuencia para recalcar la dependencia con la longitud de onda).
21. **Dispersión de la guía de onda.** La dispersión de una señal en una fibra óptica, atribuible a la dependencia de las velocidades de fase y de grupo con la longitud de onda a consecuencia de las propiedades geométricas de la fibra. (En las fibras ópticas esta dependencia tiene lugar por medio del cociente (a/λ) , siendo a el radio del núcleo y λ la longitud de onda).
22. **Dispersión del material.** Dispersión atribuible a la dependencia del índice de refracción, con la longitud de onda, en el material usado para elaborar la fibra óptica. (Esta dispersión se caracteriza por el coeficiente de dispersión del material).
23. **Dispersión Rayleigh.** Esparcimiento de la luz a causa de fluctuaciones en el índice de refracción, de pequeño tamaño respecto a la longitud de onda. La potencia retrodispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de longitud de onda.
24. **Dispersión temporal de impulsos.** Un incremento en la duración de los impulsos. La dispersión temporal de los impulsos puede especificarse por medio de la respuesta impulsiva, del valor cuadrático medio del ensanchamiento o del ensanchamiento entre puntos al 50% de amplitud.
25. **Dispersión.** Cambios en la dirección de los rayos de luz, o fotones, después de interferir con alguna pequeña partícula. Puede considerarse también como la difusión de un haz de luz a causa de las inhomogeneidades del medio.
26. **Distorsión modal (o distorsión intermodal).** En fibras ópticas multimodo, es la distorsión resultante de la combinación de mecanismos de atenuación y dispersión.
27. **Distribución de modos en equilibrio.** En fibra ópticas multimodo, la condición para la cual la distribución relativa de potencia entre los modos de propagación es independiente de la longitud (véase también longitud de equilibrio).
28. **Eficiencia o rendimiento cuántico.** En una fuente o detector óptico es la relación entre los quanta de salida y los quanta de entrada.
29. **Eficiencia o rendimiento de una fuente óptica.** El cociente entre la potencia óptica emitida y la potencia eléctrica de entrada.
30. **Emisión espontánea.** Radiación emitida cuando la energía interna de un sistema cae desde el estado de excitación a otro más bajo, con independencia de la presencia o no de una radiación similar.

31. **Emisión estimulada.** Radiación emitida cuando la energía interna de un sistema cae desde un nivel de excitación a un nivel más bajo e inducida por la presencia de una radiación energética de la misma frecuencia.
32. **Empalme por fusión.** Empalme realizado con aplicación localizada de calor suficiente para fundir o soldar los extremos de dos longitudes de fibra, formando una fibra óptica continua.
33. **Empalme.** Una unión permanente cuyo propósito es acoplar potencia óptica entre dos fibras ópticas.
34. **Error de concentricidad núcleo/revestimiento (CC_0/CL).** Distancia (x) entre el centro del núcleo y el centro del revestimiento, dividida por el diámetro del núcleo DC_0 .
35. **Error de concentricidad/superficie de referencia.** Distancia entre el centro del núcleo y del centro de la superficie de referencia, dividida por el diámetro del núcleo.
36. **Espectro óptico.** Espectro electromagnético en la banda de longitudes de onda comprendida entre el ultravioleta y el infrarrojo lejano: desde 40 nm a 1 mm.
37. **Férula.** Pieza de fijación mecánica, normalmente un tubo rígido, usado para confinar el extremo de una fibra o haz de fibras.
38. **Fibra con revestimiento plástico.** Una fibra óptica con núcleo de óxido de silicio y revestimiento de plástico.
39. **Fibra de índice gradual.** Fibra óptica con un perfil de índice gradual.
40. **Fibra de salto de índice.** Fibra óptica con perfil de índice caracterizado por un valor constante en el núcleo, y un salto abrupto en la frontera núcleo-revestimiento.
41. **Fibra débilmente guiante.** Una fibra para la cual la diferencia entre el máximo y el mínimo valor del índice de refracción es pequeño. (Usualmente esa diferencia es <1%).
42. **Fibra monomodo.** Fibra óptica en la cual solo se puede propagar el modo de más bajo orden, a la longitud de onda de interés.
43. **Fibra multimodo.** Fibra óptica en la cual puede propagarse más de un modo a la longitud de onda de interés.
44. **Fibra óptica.** Guíaonda en forma de filamento, hecho de material dieléctrico, capaz de guiar potencia óptica
45. **Fotodiodo avalancha (APD).** Fotodiodo diseñado para aprovecharse de un proceso interno de multiplicación en la corriente generada por la luz.
46. **Fotodiodo PIN.** Fotodiodo con una gran región intrínseca emparedada entre dos regiones semiconductoras dopadas según P y N .
47. **Fotodiodo.** Un diodo para producir corriente mediante la absorción de la luz.
48. **Fotón.** Quantum de energía electromagnética. La energía del fotón es $h\nu$; siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia.

49. **Función de transferencia, respuesta en banda base.** La respuesta en banda base puede expresarse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.
50. **Guiaondas óptica.** Estructura capaz de guiar potencia óptica.
51. **Infrarrojo.** Región del espectro óptico entre el extremo superior del campo visible (unos 0.7 μm) hasta las microondas (alrededor de 1 cm).
52. **Intensidad.** El cuadrado del valor de la amplitud del campo eléctrico de una onda luminosa.
53. **Láser empujado por emisión.** Un láser cuya longitud de onda de pico es controlada por la inyección de una señal óptica procedente de otra fuente.
54. **Láser multimodo.** Un láser que produce emisión de luz en dos o más modos transversales longitudinales.
55. **Láser.** Dispositivo que produce una radiación óptica con amplificación estimulada de la emisión luminosa y mediante una cavidad resonante para proporcionar una reglamentación positiva.
56. **Línea espectral.** Una estrecha gama de longitudes de ondas emitidas o absorbidas.
57. **Longitud de coherencia.** Distancia de propagación sobre la cual la señal de la luz puede considerarse como una radiación coherente.
58. **Longitud de equilibrio.** Para unas condiciones de inyección concretas es la distancia en la fibra óptica multimodo necesaria para alcanzar la distribución de modos en equilibrio.
59. **Longitud de onda de corte.** Una longitud de onda a partir de la cual un modo particular deja de ser guiado. En las fibras monomodo interesa conocer la longitud de onda de corte correspondiente al modo de segundo orden.
60. **Longitud de onda de pico.** Aquella longitud par ala cual es máxima la intensidad radiada por una fuente en una dirección determinada.
61. **Luz.** Región del espectro electromagnético que puede percibir el ojo humano, nominalmente en la banda de longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 μm .
62. **Macrocurvaturas.** En una fibra óptica, las desviaciones macroscópicas del eje respecto a una línea recta; se distinguen de las microcurvaturas.
63. **Microcurvaturas.** Curvas del eje axial de la fibra óptica con desplazamientos de algunas micras y espaciamiento longitudinal de unos pocos milímetros. Estas curvaturas pueden proceder de las fases de recubrimiento, cableado, embalaje, instalación, etc.
64. **Modo guiado.** En una fibra óptica, un modo cuyo campo decrece monótonamente en la dirección transversal y en el exterior del núcleo, no perdiéndose potencia por radiación.
65. **Multiplexaje en longitud de onda (WDM).** Capacidad de soportar dos o más canales sobre una misma fibra óptica, los canales se diferencian por su longitud de onda óptica.

66. **Núcleo.** Región central de una fibra óptica a través de la cual viaja la mayor parte de la potencia óptica transmitida.
67. **Perfil de índice gradual.** Perfil de índice el cual varía en función del radio, dentro del núcleo.
68. **Perfil de índice.** La distribución del índice de refracción a lo largo de un diámetro de la fibra óptica.
69. **Perfil parabólico.** Perfil de índice gradual, en forma de ley potencial, en donde $g=2$.
70. **Preforma.** Una estructura de la que, por estiramiento, se puede obtener una fibra óptica.
71. **Radiación coherente.** Radiación caracterizada por una determinada relación de fase entre los puntos de una onda electromagnética.
72. **Radiación no-coherente.** Radiación caracterizada por un grado de coherencia acusadamente menor de 0.88.
73. **Recubrimiento primario.** El recubrimiento (posiblemente no todo él aplicado en una sola operación) de un material único aplicado en íntimo contacto a la fibra con el fin de mantener la integridad inicial de dicha superficie.
74. **Recubrimiento secundario.** Recubrimiento aplicado directamente sobre el recubrimiento primario, para mejorar las propiedades de la fibra con vista a una ulterior manipulación y cableado.
75. **Reflexión Fresnel.** La reflexión de una porción de luz al incidir en la interface plana de dos medios homogéneos con diferentes índices de refracción.
76. **Refracción.** La curvatura o cambio de dirección que sufre un haz luminoso al atravesar la interface entre dos medios distintos, o dentro de un medio cuyo índice de refracción es una función continua de la posición.
77. **Revestimiento.** Todo el material óptico de la fibra salvo el núcleo.
78. **Ruido cuántico.** Ruido atribuible a la naturaleza discreta o en partículas de la luz.
79. **Ruido modal.** Ruido generado en un sistema por una fibra óptica como combinación de atenuación óptica dependiente del tipo de modo y fluctuaciones de la distribución de potencia entre los distintos modos guiados o en las fase relativas de los modos guiados.
80. **Sensibilidad.** Potencia mínima necesaria para alcanzar un determinado comportamiento, en términos de relación señal/ruido u otra medida.
81. **Ultravioleta (UV).** Región del espectro óptico entre la parte inferior del espectro visible (unos $0.4 \mu\text{m}$) y $0.04 \mu\text{m}$.

GLOSARIO

BIBLIOGRAFIA

1. American Microsystems, Inc. "MOS Products Catalog", 1982.
2. Agencia de Cooperación Internacional, "Cable de Fibra Óptica", Escuela Nacional de Telecomunicaciones, México. 1984.
3. Allard, Frederick C., "Fiber Optics Handbook for Engineers and Scientists, McGraw- Hill Int., 1990.
4. Aguilera, Daniel "Amplificadores Optoelectrónicos de Alta Frecuencia para Transmisión Digital por Fibra Óptica", 1989
5. Bellamy John, "Digital Telephony" Willey Interscience, 1991.
6. Brizuela, Marta Elena, "Diseño de un sistema de Transmisión de Datos mediante Fibra Óptica", 1988.
7. Belden, "Guide to Fiber Optic Installation"-Wire and Cable, 1986.
8. Belden, "Fiber Optics Cable Catalog"-Wire and Cable, 1987.
9. "Curso de Telefonía"- Revisión Programada y Exámenes.
10. Connor, F.R. , "Modulation" Edward Arnold Ltd., 41 Bedford Square, Londres, 1982.
11. Conductores Latincasa-Ericsson, "Comunicaciones por Fibra Óptica", Editorial Colunga Publicidad, S.A. de C.V.
12. Condumex,"Manual de Cables de Fibras Ópticas".
13. CCITT, Recomendación G. 707.
14. Codenoll Technology Corporation, Curso-Basics of Fiber Optics, Elements and Design, 1991.
15. Carlson, Bruce A., Sistemas de Comunicación, McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.1980.
16. Diconet, G., "Design and Prospects for the ISDN" Artech House, Inc.Norwood, MA 02062, 1987.
17. Datapro, "Management of International Telecommunications", McGraw-Hill Inc., 1991.
18. Ericsson-Latincasa, "Cables para Telecomunicaciones", 1986.
19. Ericsson-Latincasa, "Comunicaciones por Fibra Óptica", 1987.
20. Freeman, Roger L. , "Telecommunication Transmission Handbook" Wiley-Interscience, S.A. E.U.A, 1975.
21. Hernández, Elias, "Metodología de Diseño de un Enlace de Comunicación por Fibras Ópticas"
22. Herrera, Enrique, "Fundamentos de Ingeniería Telefónica", Editorial Limusa, 1979.
23. Hewlett-Packard, "Fiber Optic Test Equipment", General Information Equipment, 1986.
24. Hecht-Sams, Jeff, "Understanding Fiber Optics". Prentice-Hall Computers Publishing. 1993.

BIBLIOGRAFIA

25. International Business Machines Corporation, "Integrated Digital Network Exchange" (Digest). 1990.
26. ITESM, Campus Monterrey, "Fibras Ópticas"- Apuntes del Centro de Óptica. Latincasa.
27. Karp, Harry, "Practical Applications of Data Communications", McGraw-Hill, Nueva York, U.S.A., 1980.
28. Kao, Charles K., "Optical Fibers Systems Technology Design and Applications", Editorial McGraw-Hill Int., 1986
29. Kueck, John A., "Fiber Optics", Editorial Tab Books, Inc., 1990.
30. Laguna Alejandro, "Fibras Ópticas" Cursos de Educación Continua,
31. *Conductex*, 1987.
32. Mahlke, Günter and Gossing, Peter, "Conductores de Fibras Ópticas", Planificación de las Instalaciones, Siemens, 1987.
33. Nerou, Jean Pierre, "Introducción a las Telecomunicaciones por Fibras Ópticas", Editorial Trillas. 1991.
34. Proakis, John G. "Digital Communications"
35. Rittich, Dieter-Sturm, Hartwig, "Telecommunication Reports", Optical
36. Communications ANT Telecommunication, 1986
37. Schwartz, Mischa, "Transmisión, de Información, Modulación y Ruido" McGraw-Hill. 1983.
38. Siemens "Telecomunicación Digital", España.
39. Stromler, Ferrel G. , "Introducción a los Sistemas de Comunicación" Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. Wilmington, Delaware, E.U.A, 1993
40. Shannon, Claude E. "Teoría Matemática de la Comunicación"
41. Shanmugam, K.S., "Digital and Analog Communication Systems"
42. Siemens, "Telecomunicación Digital" -Información Básica-. Tomo I
43. Siemens, "Telecomunicación Digital" -Equipo de Línea para Sistemas de Transmisión por Fibras Ópticas.
44. Safford, Edward L., "Introducción a la Fibra Óptica y el Laser", Editorial Paraninfo. 1988
45. Senior, J. M., "Optical Fiber Communications": Principles and Practice, Editorial Prentice-Hall.
46. Spectrum, enero, 1994.
47. "Telecomunicación Digital" Serie Telecomunicación Digital, Libro de Bolsillo, Editorial Marcombo, 1988.
48. Tomasi, Wayne, "Advanced Electronic Communications Systems" Prentice Hall. Englewood Cliff N.J.07632, U.S.A., 1992.
49. Tanenbaum, Andrew S. , "Computer Networks" Prentice Hall, Englewood Cliffs. N.J., U.S. A., 1988.

50. Tingye "Optical Fiber Communications"
51. *Telepress Latinoamericana*, sep.-oct., 1993.
52. *Telecommunications*, dic. 1993.
53. Watson, "Optoelectrónica", Editorial Limusa.
54. Werner, Feyerabend, "Telecommunications Reports" (optical Communications). ANT Telecommunications, 1986.
55. Ziemer R. E. "Principios de Comunicaciones"
56. Zanger, Henry-Zanger, Cinkya, "Fiber Optics Communications and other Applications", Maxwell- McMillan Int., 1991