



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales

" ARAGON "

63
28

"DISEÑO DE ENLACES TELEFONICOS DE LARGA
DISTANCIA UTILIZANDO FIBRA OPTICA "

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO
ELECTRICO**

P R E S E N T A :

RAMIREZ IBARRA GERARDO

ENEP



ARAGON

San Juan de Aragón, Edo. de México

1995.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

**AGRADEZCO A MIS PADRES
SU COMPRESION, APOYO Y
PACIENCIA, PARA ALCANZAR
ESTA META.**

CON CARINO A MIS HERMANAS

QUIERO AGRADECER
A TODAS LAS PERSONAS
PROFESORES, COMPAÑEROS
DE GENERACION Y AMIGOS
QUE ME BRINDARON SU APOYO
PARA EL DESARROLLO DE ESTA
TESIS.

MUY ESPECIALMENTE A LAS SIGUIENTES PERSONAS

ING. RAUL BARRON VERA
ING. SILVIA VEGA MUYTOY
ING. DAVID MOISES TERAN PÉREZ
ING. JAIME ARROYO MORA
ING. ANGEL MAZZA ARIAS



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

GERARDO RAMÍREZ IBARRA
P R E S I D E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 5 de enero del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. DAVID MOISES TERAN PEREZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " DISEÑO DE ENLACES TELEFONICOS DE LARGA DISTANCIA UTILIZANDO FIBRA OPTICA ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Mex., 10 de enero de 1995
EL DIRECTOR


M en I. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

c c p | Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica.
c c p | Ing. Raúl Barrón Vera, Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica
 | Eléctrica.
c c p | Ing. David Moisés Terán Pérez, Asesor de Tesis.

CCMC-AIR-11a.

FALLA DE ORIGEN

INDICE

	INTRODUCCION	1
1	ANTECEDENTES	3
	1.2. DESCRIPCION DE ENLACES DE LARGA DISTANCIA TELEFONICA	6
	1.3. TENDENCIAS Y APLICACIONES FUTURAS	9
	1.4. REQUERIMIENTOS ACTUALES	12
2	COMUNICACIONES DIGITALES	
	2.1 CONCEPTOS BASICOS DE COMUNICACIONES DIGITALES	13
	2.1.1 SISTEMAS DE COMUNICACION	13
	2.1.2 SEÑALES DE COMUNICACION	14
	2.1.3 TIPOS DE SEÑALES	15
	2.1.4 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	16
	2.2 CONCEPTOS DE TELECOMUNICACIONES	17
	2.2.1 TRANSMISION DE DATOS	17
	2.2.2 MODOS DE TRANSMISION	17
	2.2.3 SISTEMAS DE TRANSMISION DE DATOS	18
	2.2.4 PROBLEMAS PARA LA TRANSMISION	19
	2.3 DETECCION Y CORRECCION DE ERRORES	23
	2.3.1 DETECCION DE ERROR	23
	2.3.2 CORRECCION DE ERROR	24
	2.4 PROBABILIDAD DE ERROR Y TASA DE ERROR EN BITS	26
	2.5 PROTOCOLOS	27
3	MODULACION Y CODIFICACION PCM	29
	3.1 FILTROS	30
	3.2 MODULACION POR PULSOS CODIFICADOS	33
	3.3 CODIGOS UTILIZADOS EN PCM	39

4	MULTIPLEXAJE DIGITAL	42
4.1	MULTIPLEXAJE POR DIVISION DE TIEMPO (TDM)	43
4.2	SISTEMA DE PORTADORA TDM	48
4.3	CODIFICADORES Y DECODIFICADORES	51
5	FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES	52
5.1	EVOLUCION DE LAS FIBRAS OPTICAS	52
5.1.1	EL MERCADO DE LA FIBRA	55
5.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	56
5.2.1	VENTAJAS	57
5.2.2	DESVENTAJAS	60
5.3	PRINCIPIOS DE OPERACION Y PARAMETROS CARACTERISTICOS	60
5.3.1	LONGITUD DE ONDA	61
5.3.2	LEYES DE REFLEXION Y REFRACCION	62
5.3.3	APERTURA NUMERICA	63
5.3.4	LONGITUD DE ONDA DE CORTE	64
5.3.5	FRECUENCIA NORMALIZADA	65
5.3.6	PERDIDA DE FRESNEL	65
5.3.7	ATENUACION	65
5.3.8	DISPERSION	67
5.3.9	TIPOS DE FIBRA OPTICAS	69
5.4	CONECTORES Y EMPALMES	75
5.4.1	ATENUACION EN LOS EMPALMES	76
5.4.2	TIPOS DE CONECTORES	80
5.4.3	EMPALMES	83
5.4.4	TECNICAS DE EMPALME	87
5.5	TIPOS DE CABLES OPTICOS	83
5.5.1	PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UN CABLE OPTICO	84
5.5.2	ESTRUCTURAS DE CABLE	96
6	DISEÑO DEL ENLACE	
6.1	EQUIPOS CARACTERISTICOS	99
6.1.1	NOCIONES BASICAS	99
6.1.2	EQUIPOS DE LINKA	100
6.1.3	ALOJAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISION	101
6.1.4	ALIMENTACION DE ENERGIA	101
6.1.5	SUPERVISION Y LOCALIZACION DE FALLAS	101

6.2	ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ENLACE	102
6.2.1	CAJAS DE EMPALME	102
6.1.2	CAJAS DE EMPALME CILINDRICO	102
6.2.3	CAJA DE EMPALME RECTANGULAR	103
6.2.4	CAJAS PARA REGENERADORES	104
6.2.5	EMPALMES Y CONECTORES	104
6.2.6	PROCEDIMIENTOS PARA LA INSTALACION DE CAJAS DE EMPALME	105
6.3	DATOS Y ESPECIFICACIONES PARA EL ENLACE	106
6.3.1	DATOS FUNDAMENTALES	106
6.3.2	ATENUACION DE LA TRANSMISION	106
6.3.3	MARGEN DEL SISTEMA	107
6.3.4	METODO PARA EL CALCULO DE LA ATENUACION DEL SISTEMA	107
6.3.5	METODO PARA EL CALCULO DEL ANCHO DE BANDA DEL SISTEMA	108
6.4	CALCULO DEL ENLACE	109
6.4.1	UMBRAL DE DETECCION	110
6.4.2	FLUJO ENERGETICO EMITIDO POR LA FUENTE	110
6.4.3	PERDIDAS POR ACOPLAMIENTO Y CONEXIONES	111
6.4.4	REPRESENTACION GRAFICA DEL CALCULO ENERGETICO	111
6.4.5	CALCULO NUMERICO DEL ENLACE	113
7	INSTALACION Y PRUEBAS	
7.1	TIPOS DE INSTALACION DE FIBRAS OPTICAS	114
7.1.1	INSTALACION EN DUCTOS SUBTERRANEOS	114
7.1.2	INSTALACION DIRECTAMENTE ENTERRADO	115
7.1.3	INSTALACION AEREA	116
7.1.4	INSTALACION SUBMARINA	117
7.1.5	INSTALACION EN INTERIORES	117
7.2	CONSIDERACIONES Y CUIDADOS PARA UNA INSTALACION PRUEBAS PARA GARANTIZAR UN ENLACE	117
7.2.1	GENERALIDADES	117
7.2.2	PROTOCOLO DE INSTALACIONES	120
7.2.2.1	PLANIFICACION E INGENIERIA DEL PROYECTO	121
7.2.2.2	LIMPIEZA VERIFICACION Y GUIADO DE LA VIA	122
7.2.2.3	INSTALACION DE FLEXODUCTOS Y TAPAS	122
7.2.2.4	GUIADO DE FLEXODUCTOS PARA INSTALACION DE CABLE	123
7.2.2.5	INSTALACION DEL CABLE	124
7.2.2.6	ACOMODO Y FIJACION DEL CABLE	126
7.2.2.7	EMPALMES RECTOS, TERMINALES Y PRUEBAS A CABLE INSTALADO	128
7.2.2.8	PRUEBAS FINALES	127
	CONCLUSIONES.	129
	BIBLIOGRAFIA	130

INTRODUCCION

En el 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 el 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:

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

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

C A P I T U L O I

ANTECEDENTES

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, la del receptor. Esta forma de red se emplea todavía en algunos casos para sistemas de telecomunicaciones muy pequeños.

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.

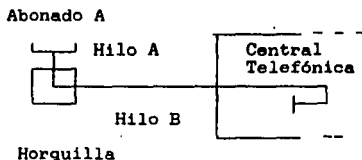


Figura 1.1 Línea de abonado

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 a 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 geestacionaria, 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 esta una alternativa viable a los tradicionales alambres de cobre y cables coaxiales en redes de comunicaciones por un par de éstas.

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 desarrollar a los seres humanos, cualquier actividad relacionada con la sociedad misma, como si estuvieran reunidas en 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 inicio 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 velocidad aun mayor de lo que hemos conocido hasta ahora. Dentro de los servicios con que se puede contar hoy día se pueden mencionar los siguientes:

- Telefonía
- Facsímil
- 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.

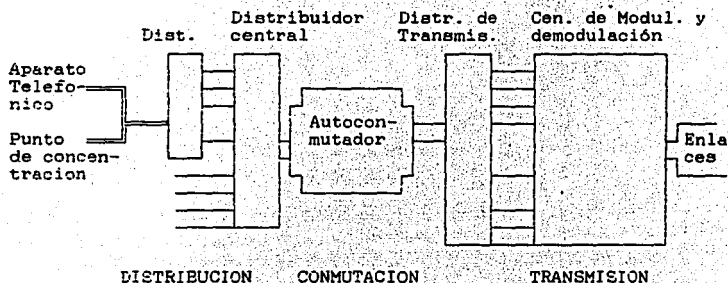


Figura 1.2. Principales elementos de comunicación en una red telefónica

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 tipos de origen y destinos

Asimismo es útil conocer que existen básicamente tres topologías de red, que son las siguientes:

- Malla
- Estrella
- Estrella Doble

Las cuales se pueden combinar de diferentes formas.

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 enrutar las comunicaciones de larga distancia.

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 permiten manejar velocidades de transmisión de 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 del 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.
- AMERICA 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 aunado a las decisiones de extender el servicio telefónico. Este crecimiento se ve influenciado por cinco factores, principalmente:

- 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 de 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.

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 estas 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.

Servicios 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 para 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 de 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 esta siendo complementada 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

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 estos con el fin de obtener una mejor confiabilidad, rapidez y sobre todo mayor eficiencia en los mismos.

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.

C A P I T U L O . I I

COMUNICACIONES DIGITALES

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 fácil 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.

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.

2.1.1 Sistemas de Comunicación

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

- Transmisor.
- Canal.
- Receptor.

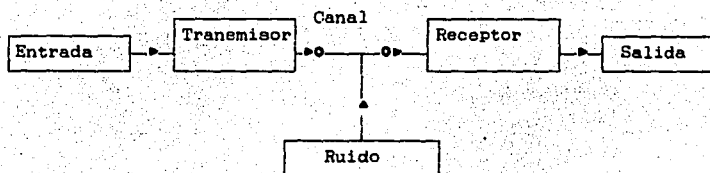


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones.

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 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 una onda de sonido o cualquier onda senoidal. Las señales digitales consisten básicamente de pulsos los cuales ocurren en intervalos discretos de tiempo. Los pulsos pueden presentarse de forma simple o determinado periodo de tiempo o en grupos, en forma de códigos, como el telegrama.

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 frecuencias subsónicas (de pocos Hertz) hasta los rayos cósmicos. 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:

$$\lambda = c/f \quad (2.1)$$

donde:

λ = Longitud de onda (m)
c = Velocidad de la luz (300,000,000 m/s).
f = Frecuencia (hertz = ciclo/seg.)

2.2 CONCEPTOS DE TELECOMUNICACIONES

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

2.2.1. Transmisión de datos

Normalmente el termino "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 un 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 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 la 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 de 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 esta 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 este, el resultado será la pérdida de información en la transmisión.

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

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

donde:

H = Capacidad del canal en bits
B = Ancho de banda del canal
T = Tiempo de transmisión

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 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 este 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 de comunicación 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 generando 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.

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

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

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

PAM	$B' = 1/W$
PDM	$1/W < B' < 5/W$
PPM	$B' = 5/W$

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 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.

2.3 Detección y corrección 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.

2.3.1 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 esta 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 redundancias vertical y horizontal (Vertical and horizontal redundancy checking). El chequeo de redundancia vertical (VRC) utilizando la paridad determina dentro de que carácter esta 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 una secuencia de bits utilizado para detectar error.

Código de ciclo redundante (Cyclic redundancy cheking). Probablemente el CRC sea el esquema más confiable para la detección de error. Con el CRC aproximadamente el 99.95% 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.

2.3.2 Corrección de Error

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

Substitución de símbolos (Symbol substihrtion). Fue diseñada 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 substitución 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:

$$2 > m + n + 1 \quad (2 .4)$$

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).

2.4 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 pueden esperar un bit erróneo por cada 10^5 bits transmitidos. Por otro lado si un sistema tiene un $BER = 10^{-5}$ significa que en el pasado tuvo 1 bit por cada 10^5 bits transmitidos.

$P(e)$ = Probabilidad de error.

es un valor matemático técnico 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:

$$BER = N_e/N_t \quad (2.5)$$

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 :

$$BER = f_b \times t_0$$

donde:

f_b = Velocidad de transmisión de bits/seg

2.5 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.
- 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 semiduplex o multipunto, de cuál estación va a transmitir o cual o cuales 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.

C A P I T U L O . . . I I I

MODULACION Y CODIFICACION PCM

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.

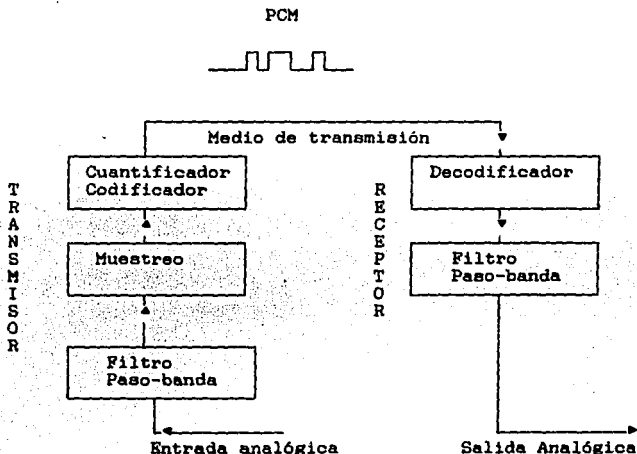


Figura 3.1 Diagrama de bloques de un sistema PCM simplex (transmisión en un solo sentido)

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.

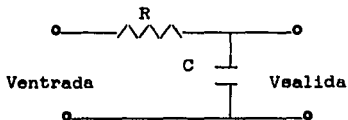


Figura 3.2 Circuito de un filtro paso-bajas

El ancho de banda es:

$$\begin{aligned} BW &= F_2 - F_1 \\ BW &= F_c - 0 = F_c \end{aligned} \quad (31)$$

En 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:

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

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 .

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.

Filtro paso-altas

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

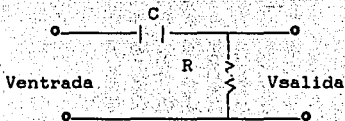


Figura 3.3 Circuito de un filtro paso-altas

Filtro paso-banda

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

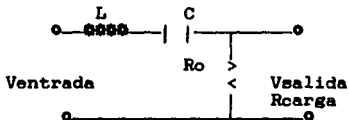


Figura 3.4 Circuito de un filtro paso-bandas

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 el circuito del filtro.

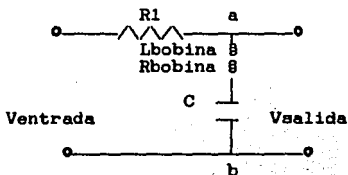


Figura 3.5 Circuito de un filtro atrapa-banda

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.

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 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 o 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 de amplitud que pueda ésta tomar, convirtiendo las muestras a una serie de niveles PAM de amplitud constante, lo que posteriormente permitirá su codificación PCM.

Durante el funcionamiento del circuito de muestreo y retención el transistor FET (Q_1), 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 (C_1) 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 cantidades de valores aleatorios, que pueda tomar la señal PAM a un número predeterminado de magnitudes absolutas. 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 ($2^3=8$).

Código binario simétrico

En la señal excepto por el bit que nos indica el signo, los códigos de la mitad superior se repiten en la mitad inferior, también 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.

La 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	+2V	110
2	t ₂	+2V	110
3	t ₃	+1V	101
4	t ₄	-1V	001
5	t ₅	-1V	001
6	t ₆	-1V	001
7	t ₇	+1V	101
8	t ₈	+3V	111
9	t ₉	+3V	111
10	t ₁₀	+2V	110
11	t ₁₁	-1V	001
11	t ₁₂	-2V	010
13	t ₁₃	-2V	010
14	t ₁₄	-1V	001

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:

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

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

$$\text{Rango dinámico} = V_{\text{max}}/\text{resolución}$$

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:

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

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 = Numero de bits a utilizar en un código PCM

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

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

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 este se expresa en porcentaje (%), como lo muestra la ecuación:

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

(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:

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

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 expresa 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 decibeles se determina como lo indica la ecuación:

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

donde:

R = Resistencia

v = Voltaje rms de señal

q = Intervalo de cuantificación

v^2/R = Voltaje de la señal rms

$(q^2/12)/R$ = Potencia de ruido de cuantificación RMS promedio

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

$$SQR \text{ (dB)} = 10 \log v^2/(q^2)/12$$

(3.17b)

$$SQR \text{ (dB)} = 10.8 + 20 \log v/q$$

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, este 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

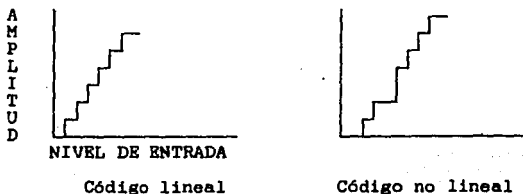


Figura 3.11 Comparación entre un código lineal y uno no-lineal

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.

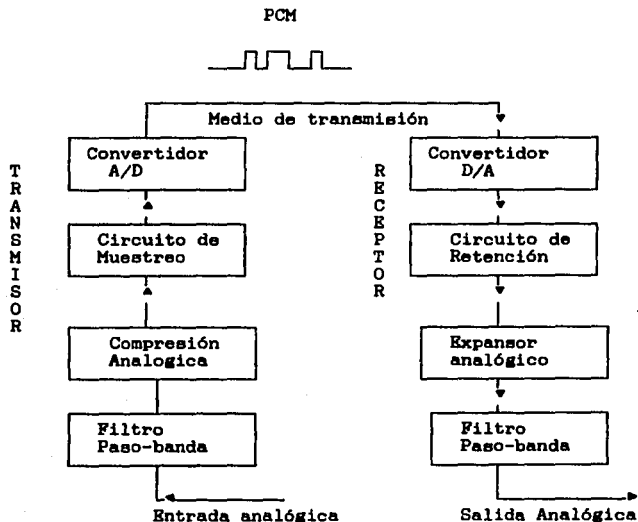


Figura 3.12 Diagrama a bloques de un sistema PCM con compresión-expansión analógica.

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.

C A P I T U L O I V

M U L T I P L E X A J E D I G I T A L

4. MULTIPLEXAJE DIGITAL

El multiplexaje digital, es una forma de compartir un mismo canal de transmisión por varios puertos 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 División Multiplexing). Existen en uso principalmente tres tipos de TDM, de acuerdo a las características de los datos transmitidos, que son, para transmisiones.

- a) Sincronas
- b) Cuasisincronas
- c) Asíncronas

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

b) Multiplexaje de transmisiones cuasisincronas. El multiplexaje de transmisiones cuasisincronas, o plesincronas, 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 utilizará 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, promediando en forma estadística el tráfico de las salidas en una línea de alta velocidad adicionalmente, pueden efectuar impresión 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 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.

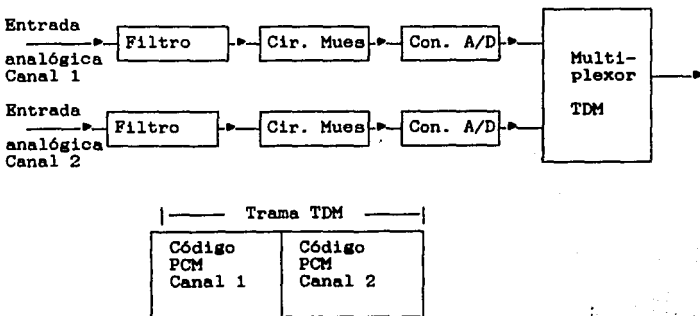


FIGURA 4.1 Sistema PCM-TDM de dos canales

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 periodo 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 utilizaran las existentes para un sistema PCM de 24 canales, y su correspondiente agrupamiento en multitrama la cual está conformada por 12 tramas.

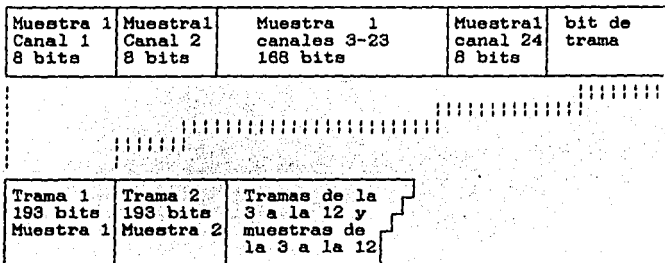


FIGURA 4.2 Formato de trama y multitrama de un sistema PCM de 24 canales

En la figura 4.2 se puede apreciar que a cada canal se le asigna un período 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 la 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 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 la 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 período 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 substitución 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 B6Z5 y B3Z5

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 período equivalente al asignado a un canal completo en cada trama. El período promedio de sincronización, está dado por:

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

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 presentar 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

CARACTERISTICAS	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	2048 kbits/s	1544 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 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
- Período 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.

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 señal original.

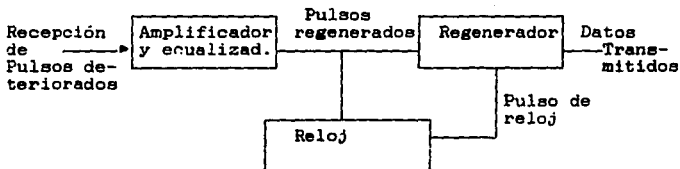


FIGURA 4.3 Diagrama de bloques de un repetidor regenerativo

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 TIC

Los sistemas de portadora T1 y TIC, permiten la transmisión de 24 canales de voz simultáneamente, a una velocidad de 1.544 Mbps utilizando codificación de línea BPRZ-AM1 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 8.312 Mbps, hasta una distancia de 700 Km, utiliza un código de línea BPRZ-AM1, 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 872 canales de voz, sobre un cable metálico sencillo, su velocidad de transmisión es de 44.736 Mbps, y utiliza una codificación de línea de substitución 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 Codificadores y Decodificadores (CODECS)

El Codec es un chip de integración a 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 termino 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.

C A P I T U L O . V

FIBRA OPTICA EN COMUNICACIONES

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.

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 las 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 usa una fibra de vidrio simple para la transmisión de imagen, pero 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 Optica 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.

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,

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

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 Siecor, los cuales continúan dominando el mercado de la industria de fabricación de ésta, abarcando el 68% del mercado entre ellos. Siecor 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.

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 de 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 (RFT), 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 tienen la gran ventaja de entregar mayor información que los sistemas existentes en el mercado, tener regeneradores 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 cable 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

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

1. Costo
2. Capacidad
3. Manejo

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 requieren una alta capacidad de transmisión en el manejo de voz, imagen y video. 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 toman 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 explicaran 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 fuente 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: analógica y digital. En una modulación análoga la intensidad del haz de luz del láser o del LED varia 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:

$$\lambda = v/f \quad (5.1)$$

Si su longitud de onda está comprendida entre $0.4 \mu\text{m}$ y $0.8 \mu\text{m}$, 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.

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.

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. Supongase 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.

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 .

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 la 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 podrían 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.

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

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 p , definido como la relación entre el flujo energético reflejado y el flujo energético incidente perpendicular a la superficie es igual a:

$$p = (n_1 - n_0)/(n_1 + n_0) \quad (5.15)$$

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:

$$\alpha = -10 \log_{10} (P_2/P_1) \quad (5.17)$$

P1 = Potencia de entrada a la fibra
P2 = Potencia a la salida de la fibra

La atenuación de una fibra óptica se mide en decibeles (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 interacciona con la materia la energía transportada por la onda se modifica. Esta modificación puede tomar dos aspectos.

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

La onda puede ser definida 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

- Atenuación de dispersión por aversión. Esta se debe 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.

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, generará 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.

5.3.9 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.

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.

Fibra multimodo de índice escalonado

Las fibras multimodo de índice escalonado son conceptualmente 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.

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 μm 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 la diferencias cruciales tales como el ancho de banda y la atenuación.

Las fibras multimodo de índice escalonado pueden tener núcleos mucho mayores que 100 μm .

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.

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 estas 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 estas 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 estas 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, depende 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:

$$N_m = [(D \times AN)^2 / \lambda] / 2 \quad (5.18)$$

donde:

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

Por lo tanto, a partir 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 e 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 a partir de estas funciones la condición para determinar los modos de operación para la fibra 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 está 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 0.18 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 θ).

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.

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 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.

5.4 CONECTORES Y EMPALMES

Para la realización practica 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 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.

Quando 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.

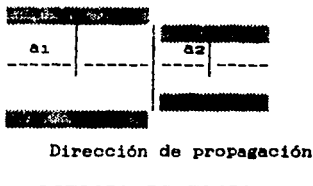


Figura 5.12 Acoplamiento entre dos fibras con núcleos diferentes

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

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.

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 enlace, 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.

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.

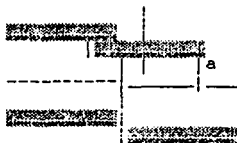


Figura 5.13 Acoplamiento entre dos fibras idénticas con deslizamiento axial.

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 β , el 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 la AN.

- 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

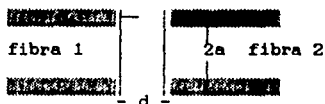


Figura 5.15 Distancia entre dos fibras

- 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 líquido adaptador de índice; así se elimina la refracción de las fronteras entre la fibra y el aire.

- 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 concentricidad 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 un 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.

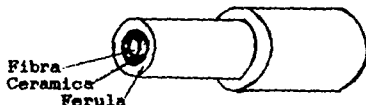


Figura 5.17 Conector tipo FC-PC

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).

c) Conector D4. Es muy similar al FC y generalmente se le conoce como D4-FC. Este conector tiene pérdidas aproximadas de 0.1 dB y una durabilidad de 1,000 inserciones, generalmente utilizado en equipo de telecomunicaciones.

Conectores biconicos

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.

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 coincidan.

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 esparcir 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, estas 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

- El 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.

- La 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 la fibras monomodo exigen alineamientos superiores en un orden de magnitud a las toleradas para fibras multimodo. En particular, para fibras con 125 μm y 5-10 μm para los diámetros del revestimiento y el núcleo respectivamente, se exigen desplazamientos laterales, entre núcleos, menores de 1-2 μm 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 μm 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 μm de diámetro para una longitud de onda de 1.3 μm .

Asimismo, el conector de varillas y el conector bicónico han sido experimentados 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 VII se muestran las ventajas que existen entre los empalmes y los conectores

TABLA VII

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. Sin 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 demasiada 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 reabiertos, si se repara o se cambian deben ser sellados herméticamente.

Existen tres principales aspectos en un 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 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. Esto puede ocurrir hasta en fibras con especificaciones normales 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 a 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 un 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 metálicos.

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 las fibras ópticas. Las fibras son cuidadosamente empalmadas en la fábrica mediante procesos de fusión que las fibras 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 empalme 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. Se centra la fibra por medio de tres áreas circulares situadas en un mismo plano.

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.

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 reacción igual al del núcleo de la fibra como se muestra en la figura 5.22.

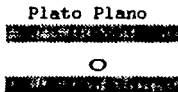


Figura 5.22. Método de ranura en "V"

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", e inclusive existe un diseño 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.

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 elastométrico

Otro tipo de empalme mecánico es el empalme elastométrico este consiste de dos tubos de material elástico con un pequeño orificio en el centro y de diámetro ligeramente menor que el de revestimiento de la fibra con un ensanchamiento en ambos extremos

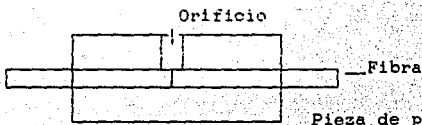
del orificio para facilitar la inserción de la fibra. Cuando se efectúa la inserción, el diámetro del orificio se expande de tal forma, que el material elástico ejerce una fuerza simétrica sobre la fibra. Esta fuerza hace que los ejes de las fibras a unir queden automáticamente alineadas sin importar 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.

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.



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.

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.

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 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 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 aun muy costoso, por lo que el método de fusión por arco eléctrico es el más utilizado, en el que 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 empalme 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.

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 cable y una funda plástica o cubierta moldeada en forma cilíndrica para cubrir todo el arreglo, mostrado en la figura 5.27.

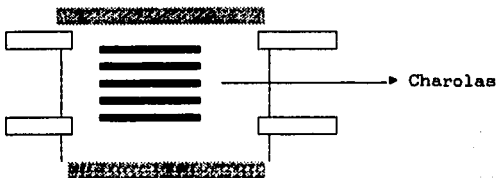


Figura 5.27 Cajas de empalmes

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 una protección adecuada. Las pérdidas originadas están por debajo de 0.1 dB/Km.

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.

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.

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.

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 lo 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 compone 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 este 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 este tiene un diámetro exterior de unos cuantos milímetros, lo que facilita el acoplamiento entre el emisor y la fibra.

Estructura típicas

Este tipo presenta un elemento de refuerzo, central o periférico. Las fibras tienen un revestimiento apretado u holgado, todo ello recubierto por un revestimiento protector,

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.

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, en las ranuras 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 una o más fibras, si contiene 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 esta la cubierta externa de PVC antifuego. Cuando lleva dos fibras su construcción es la de dos cables monofibras unidos 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.

CAPITULO VI

DISEÑO DEL ENLACE

6. DISEÑO DEL ENLACE

6.1 EQUIPOS CARACTERÍSTICOS

6.1.1 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 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 modulo emisor, esta secuencia de palabras de 6 bits se convierte, por medio de diodos láser, en una señal óptica apta para la transmisión.

8.1.2 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 convierten 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.

6.1.3 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 caseras independientes. Otra forma son los alojamientos enterrados cuyas dimensiones dependen del número de regeneradores intermedios y de la disipación de calor.

6.1.4. Alimentación de energía

Cuando 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.

6.1.5 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.

6.2 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL ENLACE

6.2.1 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.

6.2.2 Cajas 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 estas 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 elaborado 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.

6.2.3 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 termocontractil 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 termocontractil, 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 aislandose 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 termocontractil que substituye a la cubierta primaria. Estos tubos son entonces sujetados 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.

6.2.4 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.

6.2.5 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, 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 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.

6.2.6 Procedimiento para la instalación de cajas de empalme

Los procedimientos que se siguen para éste tipo de empalme son:

a) Preparación de la caja. La caja se abre retirando los tornillos de la tapa, se limpia y a los cojinetes se les quita la grasa que pudieran tener.

b) Preparación del cable. 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 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 la 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 humedad residual. Después se coloca la tapa apretando los tornillos en el orden especificado por el fabricante para lograr una alta hermeticidad.

e) Instalación. Para colocar este tipo de caja en poste, muros o interiores, se utiliza el herraje integrado a la caja para su sujeción.

6.3 DATOS Y ESPECIFICACIONES PARA EL ENLACE

6.3.1 Datos Fundamentales

Para proyectar una forma 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 cualidad 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 este se determinara si es necesario el uso de repetidores o no y el número de estos en su caso. Por ultimo, 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.

6.3.2 Atenuación de la transmisión

La atenuación de la transmisión (&) es la atenuación total medida en dB entre dos interfases dadas. Esta atenuación será provocada por:

Atf	= Pérdidas de inserción del transmisor a la fibra	(dB)
Ac	= Atenuación en el conector	(dB)
As	= Atenuación en el empalme	(dB)
Af	= Atenuación en la fibra óptica	(dB/Km)
Afr	= Pérdidas de inserción del receptor a la fibra	(dB)
Pt	= Potencia de salida del transmisor (en la interfase)	(dBm)
Pr	= Potencia de entrada al receptor (en la interfase)	(dBm)
l	= Longitud de la fibra óptica	(Km)
n	= Número de conectores o empalmes	

$$\& = Atf + n1(Ac) + n2(As) + l(Af) + Afr \quad (6.1)$$

$$\& = Pt - Pr \quad (6.2)$$

6.3.3 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 8 dB se considera suficiente para cubrir los incrementos de atenuación producidos por variaciones de temperatura, envejecimiento, y reparaciones de cable.

6.3.4 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 interfases ópticas del transmisor/receptor.
- Determinar el nivel de salida óptica del transmisor en su interfase, por medición o datos del fabricante
- Determinar el límite de sensibilidad óptica en su interfase para obtener las propiedades deseadas de la señal en la interfase eléctrica del receptor.
- Calcular o medir la atenuación total de la transmisión entre las dos interfases ópticas

- Calcular el margen del sistema (M). El margen del sistema deberá cubrir la degradación del transmisor y receptor por cambios de temperatura, posibles reparaciones de cables, desgaste de los conectores y cambios de temperatura.

$$M=(P_t - P_{rmin}) - \alpha \quad (6.3)$$

donde:

P_t = Nivel de salida óptica del transmisor
 P_{rmin} = 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

6.3.5 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.

$$T = \text{sqr}(T_t^2 + T_r^2 + T_f^2) \quad (6.4)$$

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.

6.4 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.

6.4.1 Umbral de detección

El umbral de detección P 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.

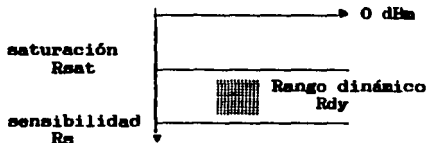


Figura 6.4 Umbral de detección y Rango de Saturación

6.4.2 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:

$$P = 0.5 P_m \quad (6.9)$$

donde:

P_m = es el flujo energético emitido para un estado alto.

	dBm	miliWatts		
—■—	0	1	1000	μ W
—	-10	0.1	100	μ W
—	-20	0.01	10	μ W
—	-30	0.0011	1	μ W

Figura 6.5 Flujo energético emitido por la fuente

6.4.3 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.

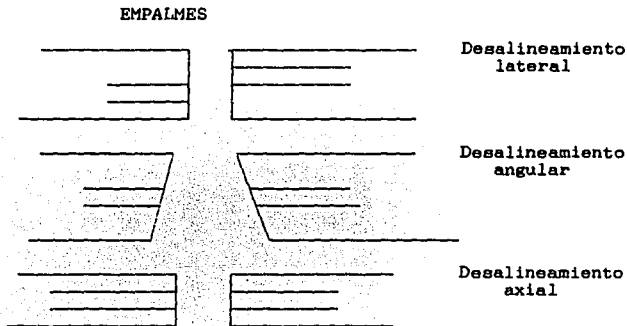


Figura 6.6 Causas de pérdidas en empalmes

6.4.4 Representación gráfica del calculo 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 calculo energético es:

$$P_{om} \leq P - (D_t + A) \quad (6.10)$$

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).

$$P_{om} + M \leq P - (D_t + A) \quad (6.11)$$

La siguiente ecuación nos permite calcular las pérdidas admisibles A conociendo las otras magnitudes.

$$A \leq P - (P_{out} + D_t + M) \quad (6.12)$$

las pérdidas debidas a la atenuación A son:

$$A(\text{dB}) = \alpha(\text{dB} / \text{Km}) * L(\text{Km}) \quad (6.13)$$

donde:

α = es el coeficiente de atenuación de la fibra a la longitud de onda de emisión.

L = es la longitud de la fibra

Conociendo A y α se deduce la longitud máxima posible para el enlace. Este calculo se puede hacer gráficamente, sobre la gráfica se pone en las ordenadas el flujo energético (en dBm) y 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 .

6.4.5 Cálculo numérico del enlace

Consideraremos para nuestro enlace el uso de fibra monomodo de dispersión corrida.

Dada la sensibilidad del equipo receptor $R_s = -30$ 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 $T_p = X$ dBm

$$\begin{aligned} T_p - R_s &\geq 25 \text{ dB} \\ T_p - (-30 \text{ dBm}) &\geq 25 \text{ dB} \\ T_p &= (-30 \text{ dBm}) + 25 \text{ dB} = -5 \text{ dBm} \end{aligned}$$

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, que pérdidas tendrá el sistema. Si el equipo de transmisión y recepción fueran los del cálculo anterior determinar si requiere de regeneradores.

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas} &= \text{Fibra} + \text{Conectores} + \text{Empalmes} \\ \text{Pérdidas} &= 400(0.2) + 4(0.5) + 10(0.2) \\ \text{Pérdidas} &= 80 + 2 + 2 = 84 \text{ dB} \end{aligned}$$

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.

C A P I T U L O V I I

INSTALCION Y PRUEBAS

7. INSTALACION Y PRUEBAS

7.1 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

7.1.1 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 deje 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:

- 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

7.1.2 Instalación directamente enterrado

Antes de iniciar los trabajos de construcción debe ser revisada la ruta propuesta para el cable enterrado. De esta manera se localizaran 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.

7.1.3 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 un 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.

7.1.4 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.

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.

7.1.5 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.

7.2.1 CONSIDERACIONES Y CUIDADOS PARA UNA INSTALACION PRUEBAS PARA GARANTIZAR UN ENLACE

7.2.1 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 estándar. 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.

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 del 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 tres 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 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 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 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 dificultara 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.

7.2.2 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 esta compuesta 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.

7.2.2.1 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 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 presenten 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 efectuó 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 el movimiento del cable en los casos de reparaciones a este. 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.

7.2.2.2 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.

7.2.2.3 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 efectuara 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 la 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 el 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.

7.2.2.4 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, la 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.

7.2.2.5 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 polyacero 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 deben considerarse anclas de impacto y cinturones de nylon en las paredes para soportar el cable.

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 longitud total del tramo a instalar, que es de 2 Km.

- Se instalara el cable en un sentido y al llegar o un punto de empalme el complemento de este carrete se desenrolla, depositandolo en el piso, se forman ochos hasta que la punta interna quede libre. Los ochos serán de longitud entre 8 y 10 metros 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 el 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 más 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 metros de exceso de longitud en cada punta de los dos cables. Ambas puntas serán desenrolladas 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 termotractil en su punta para evitar que la humedad penetre al mismo.

7.2.2.6 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 efectuó en forma simultánea con la inmersión del cable para evitar cualquier tensión adicional que pudiera maltratar el cable.

7.2.2.7 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.

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.

7.2.2.8 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 alojara 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 efectuara 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 más, 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.

C O N C L U S I O N

Hoy en día los sistemas de comunicación son tan necesarios para el tan acelerado crecimiento que se ha dado en todas las áreas productivas que nos rodean, que no podemos pasar inadvertidos, los logros tecnológicos alcanzados en el área de las telecomunicaciones, y es muy notorio especialmente el avance en materia de fibra óptica, es por eso que este trabajo fue hecho con la idea de apoyar al personal involucrado en su actividad profesional dedicada a establecer comunicación por fibra óptica, ya que nos presenta diferentes ámbitos como son el tener conocimiento de los antecedentes de la telefonía, como sistema de comunicación, sus principios básicos, los tipos de redes que se trabajan, los cambios realizados en las centrales de tipo analógico a digital, sus ventajas y posibles desventajas, así como también la incursión de la fibra óptica en todo el desarrollo de la telefonía los avances actuales en servicio celular, en transmisión de datos, pretende auxiliar al personal involucrado con los diferentes conceptos de telecomunicaciones existentes, fueron analizados los diferentes tipos de modulación y codificación, sus conceptos que determinan sus eficiencias, sus parámetros, métodos y leyes que los rigen, también se hacen notar los diferentes tipos de multiplexaje digital, sus conceptos, la fibra óptica en las telecomunicaciones, sus antecedentes y la gran evolución que ha presentado, se muestran sus ventajas y desventajas, sus principios de operación y sus parámetros característicos, los diferentes tipos de fibra óptica, sus leyes de reflexión y refracción, sus diferentes tipos de atenuación y de dispersión, los diferentes tipos de conectores y de empalmes y las pérdidas que estos ocasionan, así como las técnicas empleadas para la realización de los empalmes, se hace mención de los diferentes tipos de cables ópticos y sus parámetros característicos así como también la estructura del cable, el diseño, los equipos de línea, la supervisión y localización de fallas, se habla también de los elementos que intervienen en el enlace, de los datos y sus especificaciones a tomar en cuenta para realizar el cálculo del enlace, llevar a cabo la instalación y sus pruebas tomando en cuenta de que existen diferentes tipos de instalaciones de fibras ópticas se realizaron algunas recomendaciones para el cuidado de una instalación y se enlistaron algunas de las pruebas finales a efectuar para el sistema de comunicación.

Es por todo lo anterior que este trabajo pretende ser de gran ayuda para la integración de un sistema de comunicación, con equipo de fibra óptica dada la creciente demanda que impera en esta área y a la que como se menciona anteriormente no puede quedarse ninguna actividad empresarial ajena a la vanguardia que se presenta en materia tecnológica.

BIBLIOGRAFIA

Taub, Schilling

Principles of Communication
Systems.
Ed. Mc. Graw Hill.

James Martin

Principles of Data Communication
Ed. Prentice Hall.

R.D. Penfold

Proyectos con Dispositivos
Ed. CEAC. Perú

CSECT

Optical Fibre Communication
Ed. Mc Graw Hill.

Tuttle David

Redes Electricas
Ed. Mc Graw Hill.