

300617  
33  
29

**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE INGENIERIA  
INCORPORADA A LA U. N. A. M.**

**EMISION-RECEPCION DE SEÑALES VIA FIBRAS  
OPTICAS INSTALADAS EN LOS HILOS  
DE GUARDA DE UNA LINEA  
DE TRANSMISION**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
CON AREA PRINCIPAL EN  
ELECTRONICA Y COMUNICACIONES  
P R E S E N T A  
JUAN IGNACIO PEREZ COLLADO**

MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA LE ORIGEN

1986



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.

## INDICE

PÁG.

## INTRODUCCION

## CAPITULO I. EL USO DE LA LUZ EN LAS TRANSMISIONES MODERNAS.

1.1	La fibra óptica; un delgado cabello de vidrio.....	1
1.2	Tecnologías al servicio de sistemas completos.....	3
1.3	La luz unida al progreso.....	5
1.3.1.	Las telecomunicaciones.....	7
1.3.2.	Las transmisiones de datos.....	8
1.3.2.	Las videoconunicaciones.....	9
1.4	Redes cableadas en las ciudades.....	11
1.4.1.	Red cableada de videoconunciación.....	12
1.4.2.	Ventajas de las redes cableadas.....	17
1.5	Redes cableadas en la industria.....	19
1.5.1.	Una red para cada industria.....	20
1.6	Conclusiones.....	22

## CAPITULO II. INTRODUCCION A LAS FIBRAS OPTICAS.

2.1	Introducción.....	24
2.2	Reseña histórica.....	27
2.3	Naturaleza de la luz.....	31
2.4	Comparación entre los alambres eléctricos v las fibras ópticas.....	34
2.5	Ventajas de la transmisión por fibras ópticas.....	38
2.6	Fundamentos de las fibras ópticas.....	46
2.6.1.	Apertura numérica.....	47
2.6.2.	Modo de propagación.....	49
2.6.3.	Mecanismos de pérdidas.....	51
2.6.4.	Dispersión en el tiempo de subida.....	55
2.6.5.	Presupuesto de flujo.....	57
2.6.6.	Rango dinámico.....	63
2.7	Conclusiones.....	64

## CAPITULO III. TECNOLOGIAS DE LOS CABLES DE FIBRAS OPTICAS.

3.1	Cables de fibras ópticas.....	66
3.1.1.	Consideraciones en el diseño de cables.....	66
3.1.2.	Cables.....	69
3.2	Características de los tipos de fibras.....	73
3.3	Construcción de cables de fibras ópticas.....	76
3.4	Pruebas mecánicas a los cables de fibras ópticas.....	78
3.4.1.	Prueba de torsión.....	79
3.4.2.	Prueba de compresión.....	79
3.4.3.	Prueba de resistencia al impacto.....	80
3.4.4.	Prueba de dobléz.....	80
3.4.5.	Prueba de flexión.....	81
3.4.6.	Prueba de tensión.....	81
3.5	Instalación de cables de fibras ópticas.....	82

3.5.1.	Instalación en ductos.....	83
3.5.2.	Instalación de cables aéreos.....	85
3.5.3.	Cables directamente enterrados.....	85
3.5.4.	Instalación de cables en interiores.....	85
3.6	Conclusiones.....	86

#### CAPITULO IV. ASPECTO GENERAL DE LAS COMUNICACIONES DE FIBRAS OPTICAS.

4.1	Antecedentes.....	88
4.2	Formas de los sistemas de comunicación.....	90
4.3	Elementos de la transmisión en cadena por fibras ópticas.....	92
4.3.1.	Elementos de la transmisión.....	95
4.3.2.	Arreglos típicos de los sistemas.....	97
4.4	Sistemas de fibras ópticas.....	98
4.5	Conclusiones.....	100

#### CAPITULO V. ANALISIS DE LA TRANSMISION EN CADENA DE INFORMACION.

5.1.	Antecedentes.....	101
5.2	Fuentes y detectores ópticos.....	103
5.2.1.	Dispositivos optoelectrónicos.....	104
5.2.2.	Fuentes ópticas.....	105
5.2.3.	Detectores ópticos.....	108
5.3	Encadenamientos punto a punto.....	110
5.3.1.	Secuencia de diseño.....	114
5.4	Clasificación de señales.....	116
5.5	Probabilidad de error en la transmisión.....	119
5.6	Códigos de transmisión.....	125
5.6.1.	Código NRZ.....	127
5.6.2.	Código RZ.....	128
5.7	Conclusiones.....	129

#### CAPITULO VI. ASPECTOS GENERALES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION.

6.1	Introducción.....	131
6.2	Sistemas de transmisión y distribución.....	132
6.2.1.	Plantas generadoras.....	132
6.2.2.	Subestaciones elevadoras.....	133
6.2.3.	Línea de transmisión.....	133
6.2.4.	Subestaciones reductoras.....	133
6.2.5.	Sistemas de distribución.....	134
6.2.6.	Cargas.....	134
6.3	Características eléctricas generales.....	134
6.4	Consideraciones para el diseño de líneas de transmisión.....	139
6.4.1.	Selección y análisis del conductor.....	140
6.4.2.	Aislamiento.....	141
6.4.3.	Torres de transmisión.....	141

6.5 Cálculo mecánico de las líneas de transmisión aéreas.....142  
 6.5.1. Fórmulas del cálculo de la flecha por ecuaciones de catenaria ..145  
 6.5.2. Fórmulas del cálculo de la flecha por ecuaciones de parábola ...145  
 6.6 Conclusiones.....146

CAPITULO VII. CABLES DE FIBRAS OPTICAS INSTALADOS EN LOS HILOS DE GUARDA.

7.1 Introducción.....148  
 7.2 Sistemas convencionales de comunicación en las redes eléctricas....152  
 7.2.1. Onda portadora por hilo de guarda aislado.....153  
 7.2.2. Onda portadora por línea de alta tensión.....154  
 7.2.3. Radio y microondas.....156  
 7.2.4. Cables aéreos.....157  
 7.3 Tipos de instalaciones de fibras ópticas en líneas aéreas.....157  
 7.3.1. Método de colgado.....158  
 7.3.2. Método de catenaria.....159  
 7.3.3. Método de cable de tierra óptico (OPGW).....160  
 7.3.4. Método de enrollamiento helicoidal.....161  
 7.4 Consideraciones iniciales de diseño.....162  
 7.4.1. Núcleo óptico.....163  
 7.4.2. Estructura metálica.....165  
 7.5 Cálculo del número de hilos y paso de una corona cerrada.....167  
 7.5.1. Pérdidas de cableado.....169  
 7.5.2. Número de hilos de la corona.....170  
 7.6 Cálculo de las dimensiones de un hilo de guarda con fibras ópticas.....174  
 7.6.1. Datos iniciales.....176  
 7.6.2. Cálculo y deducción.....177  
 7.6.3. Tablas usadas en los cálculos.....181  
 7.6.4. Notas referentes al paso del cableado.....183  
 7.6.5. Carga de ruptura total del hilo de guarda.....183  
 7.6.6. Comparación de cargas.....184  
 7.7 Cálculo de la carga de tensión del conjunto de fibras ópticas.....185  
 7.7.1. Cálculos mecánicos del cable de fibras ópticas.....187  
 7.7.2. Identificación de las fibras ópticas.....189  
 7.8 Cálculo del peso total del cable.....191  
 7.8.1. Peso de las fibras ópticas.....191  
 7.8.2. Peso de la cubierta de las fibras.....192  
 7.8.3. Peso del tubo protector de polietileno.....192  
 7.8.4. Peso del núcleo protector de aluminio.....193  
 7.8.5. Peso de los alambres de acero galvanizado.....193  
 7.8.6. Peso de los alambres de allumoweld.....194  
 7.8.7. Peso total del cable.....195  
 7.9 Ejemplo y propuesta del diseño.....196  
 7.9.1. Datos iniciales.....196  
 7.9.2. Datos finales.....198  
 7.9.3. Cálculo de parámetros.....199  
 7.9.4. Cálculo de la flecha.....206  
 7.9.5. Carga de ruptura total.....206  
 7.10 Conclusiones.....207

CONCLUSIONES GENERALES.....	208
-----------------------------	-----

## APENDICES:

A) Programa de computadora para el diseño del hilo de guarda.....	211
B) Especificación típica de un hilo de guarda con fibras ópticas.....	232

GLOSARIO.....	234
---------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	239
-------------------	-----

## I. EL USO DE LA LUZ EN LAS TRANSMISIONES MODERNAS.

### 1.1 LA FIBRA OPTICA: UN DELGADO CABELLO DE VIDRIO.

En esta era industrial de rápida evolución, las palabras "FIBRA OPTICA" surgen sistemáticamente en debate. Sea porque se trata de modernizar un instrumento de producción ya existente ó porque se prepara el proyecto de una nueva tecnología ó se propone un producto serio, adecuado para las necesidades actuales, de una clientela exigente.

Ese delgado cabello de vidrio de un décimo de milímetro de diámetro, dentro del cual se transmite energía luminosa y cuya potencia se modula en función de la señal a

transmitir, reemplaza los soportes convencionales de --- transmisión de información.

El elevado valor de la frecuencia de la onda portadora, da una capacidad de transmisión muy alta: una sola fibra óptica puede transportar el equivalente de varios miles de canales telefónicos simultáneos. La gran pureza de los materiales utilizados y la tecnología moderna, hacen que las pérdidas en la línea sean muy pequeñas, aumentando considerablemente la distancia de transmisión - sin necesidad de etapas amplificadoras.

La fibra óptica ligera, poco voluminosa, con una -- gran capacidad de absorción en relación con su delgadez, es además, absolutamente insensible a las perturbaciones parásitas electromagnéticas (interferencias de radio), ó a las corrientes galvánicas.

Actualmente se vienen utilizando dos tipos de cables:

- Los cables de estructura clásica, semejantes a los cables metálicos tradicionales.

- Los cables con estructura cilíndrica ranurada, en los cuales, cada estructura está basada en el empleo de un anillo elemental, conteniendo en algunos casos hasta -



diez fibras; éstos elementos, ensamblados entre ellos forman cables que contienen hasta diez, treinta y en algunos casos más de setenta, lo cual representa una gran capacidad para transmitir información en un reducido espacio.

Dichos cables contruidos generalmente a partir de fibras de vidrio, deben poseer todas las características necesarias para mantenerse como un verdadero líder en el campo de las transmisiones: peso y dimensiones reducidas, pequeñas pérdidas, gran inmunidad a las interferencias -- electromagnéticas y excelente naturaleza dieléctrica.

Los cables de fibras ópticas pueden ser instalados -- generalmente en forma aérea, ser colocados bajo tierra ó en conductos, por lo que se les está prefiriendo sobre -- los cables tradicionales dadas sus grandes ventajas y --- adaptabilidad a diferentes tipos de condiciones.

## 1.2 TECNOLOGIAS AL SERVICIO DE SISTEMAS COMPLETOS.

Durante los últimos años, no solamente se han desarrollado con gran éxito los cables de fibras ópticas, sino también sistemas de transmisión ópticos completos; desde el cable óptico hasta los equipos optoelectrónicos, y desde su diseño hasta su instalación, lo cual es trascen-

dental e importante para un desarrollo a la par de transmisores, canales ó medios de transmisión y receptores ópticos, porque ¿De qué serviría un transmisor óptico superdesarrollado interconectado con un receptor que no pueda acoplarse al transmisor? de ahí, la importancia que los sistemas completos de transmisión óptico se desarrollen en forma conjunta para su óptima utilización.

Por todo lo anterior, las empresas líderes en el campo de la optoelectrónica, tienen que cuidar el total desarrollo de transmisores, receptores y canales de transmisión (fibras ópticas), y aquí surge el uso de una parte muy importante en los sistemas de transmisión: "Los Equipos Optoelectrónicos", de los cuales no se había comentado nada, pero tienen una vital importancia.

Dichos equipos, constituidos alrededor de un diodo electroluminiscente ó de un láser (para el emisor), de un fotodiodo PIN ó de avalancha (para el receptor), se están adaptando a diferentes aplicaciones:

- Sistemas de transmisiones telefónicas con diferentes caudales numéricos de 2, 8, 34 y 140 Mbits/seg., en la mayoría de las veces.

- Sistemas de video en banda base ó en frecuencia -- modulada.

- Sistemas de transmisión de datos equipados con módems y multiplexores ópticos.

La conexión entre la fibra y los equipos optoelectrónicos se realiza por medio de conectores ópticos, y prueban su eficiencia por los miles de kilómetros que se han instalado en varias partes del mundo, en todo tipo de climas y en diferentes condiciones.

Los equipos optoelectrónicos unidos a los cables de fibra óptica, forman los sistemas completos ópticos de -- transmisión, los cuales constituyen una verdadera tecnología para aplicarse satisfactoriamente en el campo de las transmisiones.

### 1.3 LA LUZ UNIDA AL PROGRESO.

Aunque la técnica de las fibras ópticas es muy reciente, ha tenido un notable avance desde que inició en los años de 1960 y 1961 aproximadamente, habiéndose comprobado ampliamente su fidelidad.

Existen numerosos sistemas completos de transmisión por cable de fibras ópticas, que se han diseñado, fabricado e instalado en diversas partes del mundo, principalmente en Japón, Francia, Inglaterra y Alemania, encontrándose en continuo funcionamiento, dando testimonio de su funcionalidad y eficiencia.

Actualmente, los sistemas de fibras ópticas se están prefiriendo a los sistemas tradicionales, en lugares que tengan las siguientes características:

- Caudales muy densos de datos de información.
- Necesidad de una buena calidad de transmisión en zonas perturbadas.
- Eliminación de cualquier riesgo de explosión.
- Seguridad en la transmisión (información confidencial).

En todos los campos en los que se han instalado sistemas de enlaces ópticos, éstos se han mostrado fiables, rendidores y seguros a toda prueba, como lo requiere la época actual, preparándose para las transmisiones futuras, en las que miles de usuarios se enlazarán directamente a

una completa red de servicios.

Esta nueva tecnología ha hecho y hará progresar todos los sectores del mundo contemporáneo.

LAS TELECOMUNICACIONES  
LAS TRANSMISIONES DE DATOS  
LAS VIDEOCOMUNICACIONES

1.3.1. Las Telecomunicaciones

La excepcional capacidad de los cables ópticos y la especial compatibilidad de la señal luminosa con los flujos digitales, los hacen especialmente adecuados para los enlaces con alto caudal y gran distancia.

El progreso es tal, que se han instalado enlaces urbanos intercentrales con 30.000 canales telefónicos que pasan por un cable del ancho de un dedo. Ya es normal la instalación de enlaces entre centrales, a través de fibras ópticas subterráneas y los más modernos equipos electrónicos.

Los más recientes estudios y experimentos, comprueban la realización de enlaces urbanos de aproximadamente 50 km., a una velocidad de 140 Mbits/seg. y con una pequeña

na atenuación, lo cual ya representa un gran logro en el campo de las comunicaciones.

### 1.3.2. Las Transmisiones de Datos

En la mayoría de los medios industriales se requiere una transmisión de información en forma fiable, rendidora y sin errores, así como una absoluta seguridad. La insensibilidad de los cables ópticos a las influencias - electromagnéticas y su capacidad de producir el menor -- efecto eléctrico, permite responder a tales exigencias.

El enlace óptico es especialmente adecuado para los siguientes campos:

- Transmisiones telefónicas y de datos para las re--des de energía (plantas nucleares, subestaciones) y para redes de transportes (ferrocarriles, metro, autopistas).

- Vigilancia en procesos de fabricación en las industrias.

- Medios petroleros (plataformas marinas y explota--ción terrestre).

- Aeronáutica.

Existen proyectos muy interesantes; por ejemplo, en México se piensan instalar enlaces ópticos entre subestaciones para interconectar computadoras; el cable óptico, con cubierta de aluminio y refuerzo de acero, se colocará como hilo de guarda en las torres de líneas de transmisión actuando el acero como tal; lo anterior es el punto principal que se tratará en el presente trabajo.

Debido a la insensibilidad del cable óptico a campos electromagnéticos (que son muy intensos en éste caso), se hacen ideales éste tipo de instalaciones con un doble de aprovechamiento y un gran ahorro de costos.

### 1.3.3. Las Videocomunicaciones

Dentro del campo de las videocomunicaciones, existen diversos usos de las fibras ópticas.

#### - Televigilancia:

La transmisión por cables de fibras ópticas se han vuelto comunes en las redes de vigilancia de los medios de transporte (televigilancia de los trenes, metro, tránsito urbano). Su gran capacidad y su seguridad les abren perspectivas muy interesantes en centrales militares nucleares y en los lugares peligrosos de la industria.

- Televisión Profesional:

Las redes ópticas entre estudios de televisión, dan imágenes con una gran calidad profesional fuera de lo común. Sistemas de televigilancia de vías de circulación, con enlaces de video y datos para un control eficaz de semáforos.

- Redes de Cables:

Los llamados "nuevos servicios" son ya una realidad: la teledistribución, la informática de oficina, la robótica, la enseñanza con asesoría, la telecompra, la reserva a distancia, la consulta de bancos de datos, etc., son, entre otros, los servicios que se van a desarrollar en los próximos años.

Sistemas de cable como: Cablevisión, no tardarán en cambiar sus sistemas de transmisión a equipos optoelectrónicos. Se están desarrollando redes ópticas integradas - modulares, para una adición progresiva de nuevos servicios sin modificar la infraestructura existente.

Todos éstos avances son posibles gracias a un rayo de luz. Basta con observar todas las aplicaciones que se le pueden dar, para creer, sin debate, todo lo que la luz



puede hacer con gran eficiencia y confiabilidad.

#### 1.4 REDES CABLEADAS EN LAS CIUDADES.

El crecimiento rápido de la demanda de servicios de información y de comunicación con carácter doméstico ó -- profesional y la fiabilidad de las nuevas tecnologías (fibras ópticas, satélites) requieren ahora la creación de -- redes de altas capacidades. Progresivamente éstas redes van a abrir el camino hacia una amplia gama de servicios basados en señales que emiten el sonido, las imágenes y -- los datos, por medio del teléfono, la televisión y la in--formática, respectivamente.

Actualmente, ya es posible la realización e instala--ción de redes de teledistribución ampliamente competi--vas. Servicios al instante como programas de televisión a la carta, programas musicales de alta fidelidad, están por entrar en acción.

Pensando en ampliaciones futuras, adaptándose a la -- infraestructura existente para evitar costos por modifica--ciones, surgirán otros servicios:

- A mediano plazo, los programas difundidos por saté

lites, los servicios personalizados de información, la - seguridad de los bienes, etc..

- A mayor plazo, las comunicaciones visuales entre las personas sin importar a que distancia se encuentren.

#### 1.4.1. Red Cableada en Videocomunicación

Una red de comunicación, es un conjunto de equipos (hardware) y de programas (software) que interconectan - los usuarios a prestarios de servicios ó los usuarios en tre sí.

Un material de control remoto ó una terminal, dan - al usuario acceso físico a la fuente de información.

Las comunicaciones entre usuarios y prestarios de - servicios pueden tomar diferentes caminos y las informa- ciones correspondientes son del tipo:

- a) distributivo (teledistribución)
- b) recolectado (alarma, seguridad)
- c) interactivo (comunicación vocal interpersonal)

Se perfilan redes de comunicación evolucionadas que responden a aspectos comerciales de la telemática, tele-

distribución ó videomática, dirigidas a usuarios de tipo profesional ó institucional (empresas principalmente) y a necesidades colectivas.

Para adaptar éstas redes a las necesidades, hay que tener en cuenta la demanda inmediata que justifica una -- realización a corto plazo y al mismo tiempo concebir una red evolutiva que permita realizar servicios futuros.

Un primer estudio de las necesidades reales, define el tipo de servicios por los que los usuarios están dis-- puestos a pagar un abono ó una contribución al programa. Servicios como Cablevisión, no se han expandido más debido a que hay gente no dispuesta a pagar por tales servi-- cios, y una inversión de tal tipo que requiere un mínimo de usuarios.

Existen diversos servicios reconocidos por bastantes países y pese a que en México no existen todos ellos, den-- tro de un futuro próximo se instalarán; éstos tipos de ser-- vicios son:

- Comunicación Vocal Interpersonal:

Es un servicio suministrado por la red telefónica -- central, ofreciendo una excelente calidad, tanto de servi

cio, como desde el punto de vista de cobertura geográfica. Este servicio es del tipo interactivo.

- Teledistribución:

Permite un acceso a programas de origen local, regional, nacional ó extranjero. Según el tipo de programa, los diferentes accesos a los prestarios de servicios y de programas, pudiendo ser:

a) Libre: canales nacionales, regionales ó extranjeros, radiodifundidas por emisoras en tierra ó por satélites.

b) Controlado: televisión por peaje (pago por abono ó por programa), tipo Cablevisión.

c) Personalizado: consulta de programas cortos a través de un servidor (videoteca, hemeroteca).

Este servicio es del tipo distributivo.

- Seguridad Personal y de Bienes:

Esta es una de las mayores preocupaciones de la sociedad actual, y en la que con el uso de los modernos --

sistemas de comunicación, se podrían evitar asaltos, robos, muertos, etc.. Los equipos optoelectrónicos y las fibras ópticas permiten una completa seguridad en traspa- sos bancarios, comunicaciones telefónicas, etc..

Este servicio es del tipo recolectado.

Sería egoísta y falso pensar que solamente las fi-  
bras ópticas y los equipos optoelectrónicos ofrecen las -  
mejores ventajas. La realidad es que los servicios dis-  
tributivos recolectados e interactivos descritos anterior-  
mente, son una combinación de diversas tecnologías para -  
tener costos menores, mayor eficiencia y sobre todo una -  
cobertura en la mayoría de los pueblos alejados de las --  
ciudades importantes.

Las redes mejores adaptadas se constituyen de una --  
tecnología mixta:

+ Racimos de abonados conectados en estrella alrede-  
dor de un centro de conexión y selección, con posibilidad  
de funcionamiento autónomo, gracias a antenas situadas en  
el corazón del racimo.

+ Arterias de transferencia que permiten acceder a -  
los programas no generados localmente y que realizan pos-

teriormente las interconexiones de racimos.

Esta estructura permite solucionar simplemente y a menor costo los problemas planteados por las redes: pérdidas de información, aglomeraciones en las centrales de -- distribución que impiden el acceso de los usuarios, bajas velocidades de transmisión, así como las molestas interferencias.

El tamaño óptimo de los racimos depende de las condiciones técnicas económicas, demográficas y topográficas de cada país.

En ciudades como México, se tendría que considerar el tamaño y condiciones económicas (ó gente dispuesta a -- pagar el servicio) de los alrededores a los centros de -- distribución. Las tecnologías básicas que mejor cumplen con éste propósito son:

a) La fibra óptica para la red en estrella para evitar perturbaciones e interferencias, así como aglomeraciones de información en los sitios más críticos de la red.

b) El cable coaxial para la red de transferencia.

Una red cableada de videocomunicación la podemos observar en la figura 1.4.1. de los cuales a mayor ó menor escala existen en algunas ciudades del mundo y en otras - como México se tiene sólo una pequeña parte que en los -- próximos años crecerá.

#### 1.4.2. Ventajas de las Redes Cableadas

El producto básico de las redes cableadas está destinado a colectividades de usuarios situados en zonas urbanas ó suburbanas. Según sea el caso, el fin de la red se rá para una colectividad local ó para servicio de viviendas sociales; como habíamos comentado, la concepción y -- realización de la red obedecen a datos especificos de la zona que va a recibirla; geográficos, demográficos y so--cioculturales.

Cada abonado pertenece a un racimo de usuarios, co--nectados a un canal de selección por medio de fibras ópticas. Un canal distribuye el ó los programas selecciona--dos, mientras que un canal de retorno transmite las órdenes de selección y de mando, así como la señalización pa--ra el control.

Por la línea de cada abonado sólo se transmiten los programas que éste solicite. Sea cual fuere el tipo de -

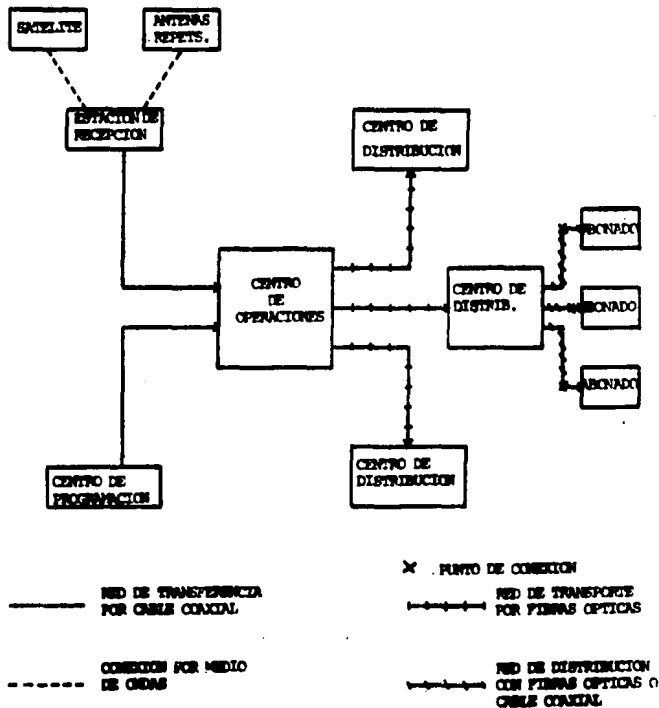


FIGURA 1.4.1.

Estructura de una red cableada entre usuarios y proveedores de servicios.



operación, un sistema de gestión computarizado permite es  
tablecer los gastos de cada abonado.

Cada usuario dispone de una unidad de conexión a la red a través de un enchufe óptico de vivienda y de una ca  
ja de control remoto infrarrojo que transmite las órdenes al centro de selección. La red permite suministrar al -- usuario dos tipos de servicios; programas de televisión - variados recibidos en un televisor y programas sonoros de alta fidelidad recibidos en un receptor estereofónico. El acceso hacia servicios más especializados, estará disponible cuando las empresas prestadoras pongan nuevas pro  
gramaciones con diferentes tópicos.

Sin tomar en cuenta la importancia de una ciudad ó población determinada, siempre será oportuno dotarla de - una red cableada, la cual multiplicará la información a los habitantes, manifestará el folklore del país y permitirá un mayor contacto con el pueblo que se podría aprove  
char para aumentar el nivel cultural del mismo y crear en el una mentalidad diferente.

Sigue en cuestión el problema de la seguridad que in  
cluye la vigilancia tanto de las personas como de sus pertenencias, éste servicio en recoger informaciones por medio de alarmas, cámaras y sistemas de seguridad, lo cual -

es útil para ayudar a individuos de edad ó enfermos y señalar robos ó desastres.

Si se estima que todo lo anterior es importante, el invertir en una red cableada se puede convertir en una -- transformación positiva de toda una colectividad.

### 1.5 REDES CABLEADAS EN LA INDUSTRIA.

El uso cada vez mayor de las fibras ópticas, la formación de nuevas compañías y el surgimiento de nuevas tecnologías, han permitido un dominio global de las redes de transmisiones ópticas.

Actualmente, las cualidades de la fibra óptica ya no necesitan demostrarse. Gracias a éstas cualidades se pueden abarcar con un papel trascendental un sin número de - campos de aplicación.

- En las telecomunicaciones, las fibras ópticas han tenido un uso intenso por su gran ancho de banda, por su espacio reducido convencieron fácilmente a técnicos y gerentes de muchas empresas, sobre todo para enlaces inter-centrales e inter-urbanos de gran capacidad y más tarde - para las redes de abonados multi-servicios como ya había-

mos comentado anteriormente.

- En el campo de las videocomunicaciones, la fibra óptica también se ha impuesto, sobre todo en las redes cableadas de teledistribución.

El enfoque ya no es el mismo cuando se trata de la esfera industrial en su sentido más amplio. En otros términos, cuando se refiere a la utilización de las fibras ópticas, tanto en los talleres ó en una estación costa -- afuera, como en los transportes urbanos ó en un aparato -- de tensión muy alta, el concepto cambia. Aquí, otras cualidades de la fibra óptica intervienen: su naturaleza --- dielectrica, su insensibilidad a las corrientes galváni-- cas y a las perturbaciones electromagnéticas. Estas cualidades son indispensables en todos los medios perturba-- dos ó de alto riesgo, razón por la cual las redes cableadas de fibras ópticas tienen un campo de acción muy exten-- so.

#### 1.5.1. Una Red para cada Industria

En los diferentes medios industriales existen motivaciones suficientes para instalar las redes de transmi-- sión ópticas. Basta con citar las perturbaciones del medio ambiente para justificar la supresión de los cables -

metálicos y el recurso a los cables de fibras ópticas.

El campo de las fibras ópticas asume el dominio global de las redes de comunicación que transportan: EL SONIDO, LA IMAGEN y LOS DATOS, en cada caso la red de comunicación es eficaz, evolutiva y obedece al mismo principio de base; presenta una estructura (en estrella, en línea) bien adaptada a la dispersión geográfica de los equipos. Un aparato de verificación central está ligado, por medio de una serie de transmisiones multi-servicios, a los diferentes puestos ó a las estaciones, en el caso de los transportes.

La gama de las industrias involucradas es vasta:

- Medios de gran perturbación e Industrias de alto riesgo:

**ELECTRICIDAD.-** En presencia de chispas de arcos de granizo, de descargas de una frecuencia muy alta, todos - generadores de perturbaciones electromagnéticas, la red - óptica permanece insensible y eficaz.

**PETROQUIMICA.-** En las instalaciones petroleras en - tierra ó en mar, en los complejos petroquímicos, en los - talleres de fundición y en las estaciones de bombeo de --

fluidos, la red óptica suprime todo riesgo de explosión.

- Transporte:

TRENES, METROS, REDES DE CARRETERAS.- Frente a las dificultades del medio ferroviario, electrificación de -- las líneas, puestos de alta tensión y frente a las perturbaciones del entorno de las carreteras, la red óptica garantiza la seguridad de las comunicaciones y de la telesu per visión.

## 1.6 CONCLUSIONES.

Con un panorama bastante específico del hoy y del mañana de las fibras ópticas, podemos decir en tres conclusiones todas las perspectivas que tienen:

a) Satisfacer las necesidades de un mundo en plena evolución, por medio de productos fiables, métodos de vanguardia y una experiencia confirmada.

b) Resolver, gracias a las cualidades de la fibra óptica, las dificultades de un medio ambiente perturbado ó de alto riesgo.

c) Preparar, mediante una investigación constante, - la nueva comunicación de la industria.

Si todo lo confiable y ventajoso es tentativo, el invertir en una red óptica reedituará en menores costos, sobre todo a futuro cuando se requieran expansiones.

## II. INTRODUCCION A LAS FIBRAS OPTICAS.

### 2.1 INTRODUCCION

Existen diversas clasificaciones de conductores eléctricos, los cuales se pueden dividir en cuatro grupos:

- Cables de energía:

Son aquellos cuya función primordial es la de transportar energía eléctrica, desde una fuente de alimentación ó generación, hasta los puntos de consumo donde la energía puede ser transformada en otras diferentes formas como luz, calor, procesos químicos, transporte, etc..

- Cables para telecomunicación:

Su función es la transmisión de señales "inteligentes" como la voz, el sonido, datos, mensajes escritos, -- etc.. Usan la energía eléctrica como un medio que se modula para la comunicación de las señales. Aquí es donde entran los cables de fibras ópticas.

- Cables para control y señales:

Su función primordial es la transmisión de señales - ó datos que sirven para el control, telecomando ó telemadición de aparatos ó instalaciones de producción, transmisión ó utilización de energía eléctrica, así como de -- sistemas de telecomunicación, control de tráficos, transportes, etc..

- Alambre magneto:

Su uso es para formación de campos magnéticos, útiles para el aprovechamiento de la energía eléctrica a través de la transformación de la misma a voltajes y corrientes adecuados y a su conversión en otras formas de energía como en motores, equipos de telecomunicación, transformadores que junto con motores (para embobinados) representan el mayor uso del alambre magneto.

Uno de los más importantes componentes de cualquier sistema de fibras ópticas, es la fibra en sí, debido a --



que sus características de transmisión juegan un papel - determinante en la confiabilidad y realización de un determinado sistema. Algunas preguntas que surgen son:

- 1.- ¿Cuál es la estructura de una fibra óptica?
- 2.- ¿Cómo se propaga la luz a lo largo de la fibra?
- 3.- ¿Qué es la atenuación ó pérdidas en una fibra?
- 4.- ¿Cómo se incorporan las fibras en estructuras - de cables?
- 5.- ¿Cómo se instalan las fibras ópticas?
- 6.- ¿Qué ventajas tienen las fibras ópticas sobre - los alambres ó cables tradicionales?

En éste capítulo y en el siguiente, se analizarán - varios conceptos concernientes a las preguntas anteriores, lo cual representa una base para el correcto entendimiento del objetivo de la tesis. Se planteará también una introducción a los sistemas de comunicación, que serán tratados en el capítulo IV y en algunos otros, debido a la importancia que presentan para la realización -- del presente trabajo.

## 2.2 RESEÑA HISTORICA.

El uso de la luz para la transmisión de señales, data de mucho tiempo atrás, pero fué sobre 1870 cuando se empezó a utilizar para fines más específicos: la transmisión de información. El descubrimiento del láser fué determinante para el avance en éste campo.

La disponibilidad de una fuente óptica monocromática, estimuló la investigación en el campo de las comunicaciones ópticas, que debido a la alta frecuencia de la portadora (100 THz), permitiría la transmisión de una gran cantidad de información. Aquí se empezarán a estudiar los fundamentos de la detección y modulación de la luz.

Los primeros experimentos fueron llevados a cabo permitiendo que el rayo láser irradiara libremente a través de la atmósfera, a manera semejante a como lo hacen las ondas de radio. Esta forma de transmisión por medio del espacio vacío pronto mostró muchos inconvenientes: falta de confianza debido a las precipitaciones (lluvia, nieve, niebla, turbulencia atmosférica, etc.). Aquí se propuso la transmisión de la señal luminosa en un medio ambiente protegido como tubos llenos de gas, tubos con lentes para afocar la señal, etc.. El uso de fibras de vidrio como medio para guiar ondas pronto apareció muy atractivo; pe-

so, dimensiones, fácil manejo y costos, fueron ventajas suficientes comparadas con las de los sistemas mencionados anteriormente.

Las fibras de vidrio guían a la luz a través de múltiples reflexiones internas.

Se demostró que al iluminar un vaso de agua y dejar pasar un chorro de agua a través de un hoyo en el vaso, la luz era conducida a lo largo de la curva formada por el chorro.

Aquí surgió la idea de las fibras de vidrio con revestimiento del mismo material.

Después de esto, las fibras de vidrio encontraron un vasto campo de nuevas aplicaciones en dispositivos ópticos, en instrumentación, en dispositivos fotoelectrónicos, procesamiento de datos y en sistemas de fotocopiado, así como en aparatos de medicina, etc.. Así mismo, aunque se conocían las grandes ventajas de las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones, no fué hasta 1966 cuando su uso en ésta área fué propuesto. La razón de esto fué, que la atenuación de las fibras de vidrio existentes en esos tiempos era de miles de dB/km, esto permitía la transmisión en pequeñas distancias solamente, ---

aunado a que no todas las fuentes y detectores de luz -- eran compatibles en tamaño con las fibras ópticas.

En 1966, Kao y Hockam investigaron que la atenuación encontrada en los cristales usados en las fibras ópticas, era no una propiedad del material, sino que era producida por la presencia de impurezas principalmente iones metálicos.

La fibra del tipo monomodo fué considerada conveniente como medio para transmitir grandes cantidades de información. En 1968 surgen las fibras multimodo de las que se trató de reducir la dispersión modal y buscar una atenuación no mayor a 20 dB/km que era el límite para transmisiones a larga distancia.

La técnica consistió en depositar una delgada capa de un material puro de sílice dopado en un tubo de sílice fundido, lo cual fué el inicio de la tecnología para la fabricación de fibras de bajas pérdidas. Se desarrolló la fibra de "núcleo líquido"; se obtenía llenando un tubo capilar de cuarzo con líquidos especialmente escogidos para tener bajas pérdidas en la transmisión, trabajando cerca de la región infrarroja; aquí se obtuvieron pérdidas debajo de 8 dB/km, pero los progresos eran continuos y en 1972 las fibras ópticas multimodo de núcleo de sílice, --

logran pérdidas menores a 4 dB/km desplazando a todas las fibras existentes.

Las nuevas posibilidades ofrecidas por las fibras ópticas estimularon la investigación de fuentes y detectores ópticos compatibles en tamaño y confiabilidad con bajos -- consumos de potencia.

En 1968 continuó el desarrollo de los láser, pero tenía el inconveniente de su bajo tiempo de vida, aunque actualmente duran más de 100 000 horas.

En 1971, en los Laboratorios Bell, se desarrollaron - cabezas emisoras de pequeña área (50 micrómetros de diámetro) recomendadas para usarse en el acoplamiento de fibras ópticas.

En 1976 los japoneses fabricaron una fibra con pérdidas mínimas de  $0.47 \pm 1$  dB/km. Con éstas pequeñas atenuaciones se inclinaron los estudios a mayores longitudes de onda y que de hecho contribuyeron a fibras con una atenuación de 0.2 dB/km para fibras monomodo de 1.55 micrómetros de diámetro que es la menor encontrada en fibras de sílice dopado junto con las bajas pérdidas encontradas, las fibras de sílice tenían otra propiedad fundamental para las longitudes de onda larga: las longitudes de onda existen -

para 1.3 micrometros, donde la dispersión del silice dopa do cae a cero; ésto quiere decir que se pueden obtener -- muy grandes longitudes de onda, ya que la dispersión del material es un último factor de la capacidad para llevar información de las fibras ópticas.

Se tienen excelentes resultados en la transmisión de alta velocidad y baja dispersión para fibras trabajando - en longitud de onda larga (como se explicará posteriormen te), en eslabones de transmisión: transmisión repetitiva a 100 Mbits/seg. sobre 63 km. de distancia, con LED's tra bajando con longitud de onda de 1.27 micrómetros.

Sólo queda decir predicciones en cuanto a atenuacio nes se refiere, en la que se esperan menores a 0.001 --- dB/km, para materiales como Tl Br y Zn Cl<sub>2</sub> la región de - 3.5 a 5.5 micrómetros de longitud de onda que dan un am- plio campo de estudio.

### 2.3 NATURALEZA DE LA LUZ.

Los conceptos acerca de la naturaleza de luz han evo lucionado con el paso de los años. En el siglo XVII se - creía que la luz consistía en flujos de pequeñas particu las emitidas por fuentes luminosas. Esas partículas eran

dibujadas como si viajaran en línea recta y se asumía que ellas podían penetrar en materiales transparentes, pero - eran reflejadas en los cuerpos opacos.

Esta teoría, describía aspectos ópticos globales en detalle como son: la reflexión y refracción, pero se olvidaba de explicar aspectos aparentemente sin importancia - como interferencia y difracción. Aquí es conveniente definir los términos anteriores:

- Reflexión:

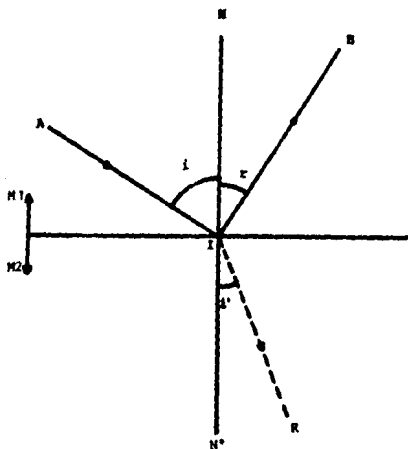
Acción de reflejar un rayo luminoso, calorífico ó -- una onda sonora. El ángulo de reflexión es el que forma el rayo incidente con la normal en el punto de incidencia.

- Refracción:

Cambio de dirección que experimenta la luz al pasar - de un medio a otro (con diferente densidad). El ángulo de refracción, es el que forma el rayo refractado con la normal en el punto de incidencia.

- Difracción:

Desviación de la luz al rozar los bordes de un cuerpo opaco; Fresnel explicó la difracción con la teoría de las interferencias.



Donde:

- NIN' - normal al punto de incidencia I.
- AI - rayo incidente
- i - ángulo de incidencia
- IB - rayo reflejado
- r - ángulo de reflexión
- IR - rayo refractado
- i' - ángulo de refracción
- M1 - medio con densidad  $R1 \text{ gr/cm}^3$
- M2 - medio con densidad  $R2 \text{ gr/cm}^3$

FIGURA 2.3.1.

Representación gráfica de los fenómenos de reflexión y refracción.



- Interferencia:

Fenómeno físico que resulta de la superposición de dos ó más movimientos ondulatorios (ondas luminosas, hertzianas, sonoras ó acuáticas) de la misma frecuencia y amplitud.

En 1815 Fresnel dió la correcta explicación de la difracción; mostró que la propagación rectilínea aproximada característica de la luz, debería ser interpretada suponiendo que la luz es una onda móvil y que el márgen de difracción debería ser considerado en detalle

Maxwell pensó que las ondas de luz eran electromagnéticas por naturaleza, observó que los efectos de polarización indicaban que las ondas de luz eran transversales -- (el movimiento de la onda es perpendicular a la dirección en la cual viaja la onda). Desde el punto de vista de la Física Óptica, las ondas electromagnéticas radiadas por una pequeña fuente óptica, pueden ser representadas por un tren de ondas esféricas con la fuente en su centro como se muestra en la figura 2.3.1..

Una onda frontal es definida como el lugar de todos los puntos en el tren de ondas, los cuales tienen la misma fase.

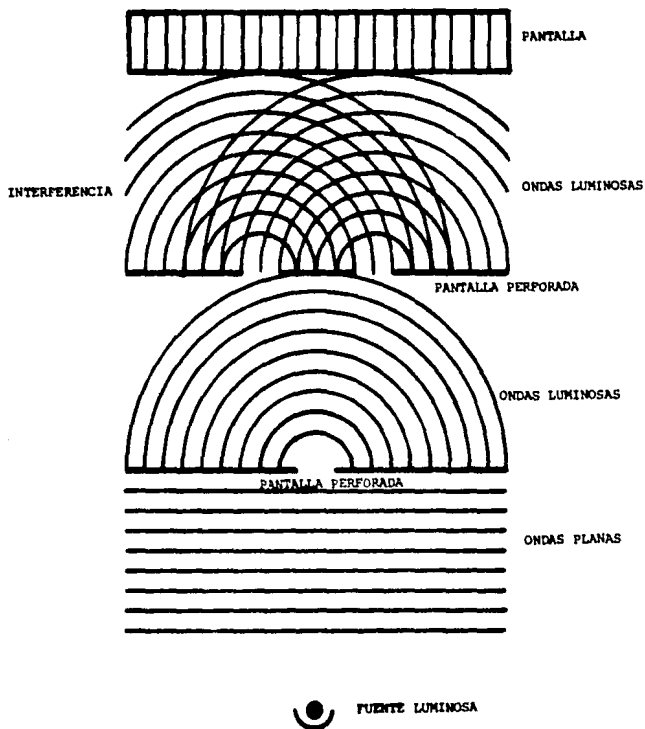


FIGURA 2.3.2.

Representación de los fenómenos de difracción e interferencia.

Cuando la longitud de onda de la luz es mucho más pequeña que el objeto ó apertura que encuentra, las ondas frontales aparecen como líneas rectas a ése objeto ó apertura. En éste caso las ondas de luz pueden ser representadas como ondas planas y la dirección de sentido puede indicarse por un rayo de luz perpendicular a la fase frontal del plano.

Los efectos de gran escala como reflexión y refracción, se analizan por procesos geométricos de trazado de rayos. El concepto de los rayos de luz es muy importante, pues los rayos muestran la dirección del flujo de energía en la luz

#### 2.4 COMPARACION ENTRE LOS ALAMBRES ELECTRICOS Y LAS FIBRAS OPTICAS.

En éste tema se explicará a manera global las comparaciones entre los alambres eléctricos tradicionales y las fibras ópticas; en el siguiente, el cual se anexa con éste, se dará un mayor análisis de las ventajas de la transmisión por fibras ópticas.

En los cables de fibras ópticas, las señales son transmitidas en forma de paquetes de energía (fotones),

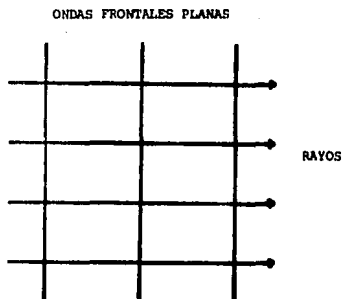
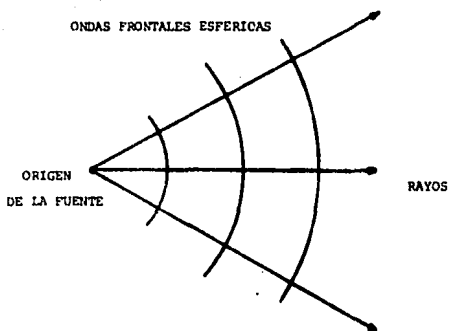


FIGURA 2.3.3.

Representación de las ondas frontales esféricas y planas así como de sus rayos asociados.

los cuales no tienen carga eléctrica. Por lo tanto, físicamente es imposible que altos campos eléctricos (altos voltajes) ó largos campos magnéticos afecten a la transmisión.

Aunque puede existir una pequeña fuga de flujo desde una fibra óptica, se pueden evitar con los blindajes, los cuales se hacen fácilmente con una cubierta opaca, así la señal de las fibras que se encuentran próximas no interferirá con otras fibras ó con los circuitos eléctricos más críticos, y la información ópticamente transmitida, es asegurada contra posibles detecciones externas. En algunas aplicaciones, las fibras ópticas pueden transportar señales lo suficientemente largas, suficientes para usarse energéticamente (como en la fotocoagulación) y potencialmente nocivas, pero en algunas aplicaciones de transmisión de datos la economía y las normas exigen niveles de flujo de 100 microwatts ó menos.

Tales niveles son seguros contra radiaciones y en caso de rotura ó daño del cable, el escape de flujo es inofensivo, sobre todo en ambientes explosivos, donde alguna chispa debida a la rotura del alambre podría ser desastroso.

Los cables de fibras ópticas con cubierta pueden so-

portar mayores abusos mecánicos (impacto, flexión, aplastamiento) que los cables eléctricos de medidas semejantes; más aún, de fibras ópticas tienen enormes ventajas de peso y dimensión para capacidades equivalentes de información. Cables especiales de fibras ópticas pueden tolerar cualquier clase de condiciones ambientales y ser sumergidos -- en algunos fluidos como agua ó aire contaminado.

Las consideraciones del ancho de banda dan una clara ventaja a las fibras ópticas.

En los cables paralelos ó coaxiales, el ancho de banda varía en función inversa al cuadrado de la longitud, -- mientras que en el cable de fibra óptica varía linealmente a la longitud.

Existen algunos valores típicos para longitudes de -- transmisión de " $\ell$ " metros:

$$1) f_{3dB} = Bw = \frac{12000}{\ell} \text{ MHz; para cables de fibras -- } \\ \text{ ópticas.}$$

$$2) f_{3dB} = Bw = \frac{225000}{\ell^2} \text{ MHz; para cables coaxiales -- } \\ \text{ típicos de 50 ohms}$$

Por ejemplo para  $l = 100$  m., el ancho de banda es únicamente de 22.5 MHz, para el cable coaxial, pero para la fibra óptica se tienen 120 MHz..

Las limitaciones de las fibras ópticas surgen principalmente en lo que se refiere a la producción del flujo óptico y en las pérdidas de flujo. Mientras tanto, la potencia en un cable coaxial puede alcanzar varios watts en forma barata; en cambio, en el cable de fibra óptica es típicamente menor que un miliwatt. En los cables de alambres pueden existir varias tomas de señales; las tomas múltiples (taps) en los cables ópticos son actualmente imprácticos, económicamente hablando.

Las pérdidas en sistemas de fibras ópticas entre dos puntos son debidas a las pérdidas en los conectores y pérdidas en la transmisión, proporcionales a la longitud del cable. Las variaciones en esas pérdidas requieren un receptor con un rango dinámico capaz de acomodar esas variaciones y poder proveer un ancho de banda (BW) adecuado, así como una suficiente señal a ruido (SNR) en razón del nivel más bajo de flujo.

Las fibras ópticas no son la mejor solución para cada problema de transmisión de datos; donde la seguridad, durabilidad, aislamiento eléctrico, inmunidad al ruido, -

tamaño, peso y ancho de banda sean necesarios, llevan una clara ventaja sobre los alambres.

Lo anterior se concluye en la tabla 2.4 que se muestra en la siguiente página.

## 2.5 VENTAJAS DE LA TRANSMISION POR FIBRAS OPTICAS.

Ya no tendría caso recalcar el porque las fibras ópticas están reemplazando a los sistemas de comunicación que usan pares de alambres trenzados ó cables coaxiales como medio de transmisión. Cuando se tenga que decidir en escoger un medio de transmisión para un determinado sistema de comunicación ó información, se tendrán que evaluar las funciones requeridas y las obtenidas de las diferentes tecnologías disponibles para usarse en tal aplicación.

Redundando un poco, pero con más detalle, resumiremos todas las ventajas que hacen atractivo el uso de las fibras ópticas como medio de transmisión; cabe señalar el aumento de 2 características más que no se habían mencionado anteriormente<sup>4</sup>.



CABLE CARACTERISTICAS	FIBRAS OPTICAS	ALAMBRES ELECTRICOS
Inducción a campos electro_ magnéticos	Nula	Alta
Ancho de banda	Alto	Bajo
Tamaño y peso	Bajo	Alto
Pérdidas	Bajas	Altas
Capacidad de transmisión	Alta	Mediana
Costo	Regular *	Regular
Niveles de potencia	Microwatts	Cientos de Watts

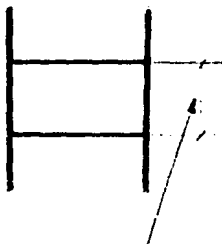
\* Tiende a ser más bajo cada día.

\* a) Dan una capacidad natural de crecimiento pensando en futuras ampliaciones.

b) Bajo peso y pequeñas medidas.

\* c) Pequeño, radio de curvatura, lo cual les da una gran flexibilidad y al fabricarse permiten alojar en un mismo carrete bastantes kilómetros, debido a que por su bajo radio de curvatura permite reducir el diámetro del tambor en el carrete.

El radio del tambor es normalmente 10 ó 20 veces el diámetro final del cable considerando la fibra, protecciones y cubierta; hablando prácticamente de unos pocos centímetros.



Carrete

Diámetro del tambor = 2 radio de curvatura del cable de fibra óptica.

- d) Bajas pérdidas y gran ancho de banda.
- e) Resistentes a las inducciones electromagnéticas y a las radiaciones.
- f) No conductivas.

En el aspecto de crecimiento, se puede aumentar su baja capacidad de velocidad de transmisión, con el simple hecho de cambiar los transmisores y receptores ópticos. En la siguiente tabla se dan las capacidades de crecimiento de diferentes medios de transmisión. Nótese que para las 3 velocidades de transmisión consideradas, las pérdidas en las fibras ópticas permanecen constantes. Mientras tanto las pérdidas en cables metálicos se incrementan a medida que se aumenta la velocidad de transmisión, lo cual a diferencia de las fibras ópticas, reducen las altas velocidades.

Para apreciar las bajas pérdidas y el extenso ancho de banda de las fibras ópticas, trazamos una curva de atenuación de señal ó pérdidas (dB/km), contra frecuencia -- (MHz) para los medios de transmisión de la tabla anterior. Aquí consideramos un par de alambres trenzados, calibre 22 AWG, como promedio entre los calibres 19 y 26 AWG.

Cuando se comparan los cables de fibras ópticas con los pares de alambres ó cables coaxiales, se observa que tienen una función de transferencia casi plana más allá - de 100 MHz, mientras en los otros casos a medida que aumenta la frecuencia, las pérdidas aumentan. Dicha gráfica se representa en la figura 2.5.2..

Recordar que la gráfica anterior se obtiene de los - datos encontrados en la tabla de la figura 2.5.1., en el que la frecuencia es igual a la mitad de la velocidad de transmisión.

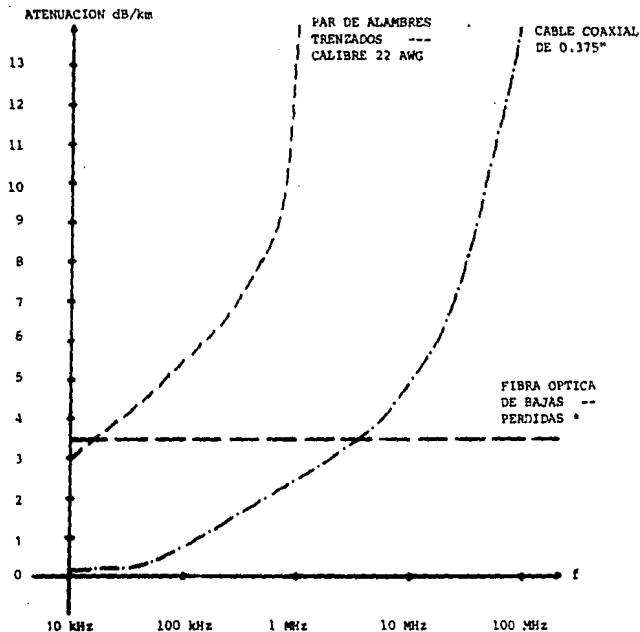
MEDIO DE TRANSMISION	Pérdidas en db/km con frecuencia - igual a la mitad de la velocidad de transmisión (1)		
	1544 Mb/s	6312 Mb/s	44736 Mb/s
Par de alambres trenzados 26 AWG	24	48	128
Par de alambres trenzados 19 AWG	10.8	21	56
Cable coaxial de 0.375" de diámetro	2.1	4.5	11
Fibra óptica de bajas pérdidas *	3.5	3.5	3.5

\* Considerando una longitud de onda de la portadora de 0.82 micrometros.

(1) Considerar velocidades para transmisión digital.

MB/s = Megabits sobre segundo.

Figura 2.5.1. Comparación de pérdidas en diferentes medios de Transmisión y para distintas velocidades.



\* Pérdidas en la fibra para una longitud de onda de la portadora de --  
0.82  $\mu\text{m}$ .

FIGURA 2.5.2.

Curva de atenuación contra frecuencia para diferentes medios de transmisión.

Las pérdidas en dB/km ó atenuación, se definen como la relación de la potencia de salida  $P_o$ . de una fibra de longitud  $\ell$  a la potencia de entrada  $P_i$ . Esta relación de potencia es función de la longitud de onda.

$$\alpha \text{ (dB/km)} = 10 \log \frac{P_i / P_o}{\ell \text{ (km)}}$$

Lo ideal es que  $\alpha$  sea igual a cero, lo cual ocurre - si  $P_i = P_o$ . también es importante la siguiente fórmula.

$$c = \lambda f$$

donde:  $c$ -velocidad de la luz (300 000 km./seg. en el vacío) en km./seg. ó m/seg.

$\lambda$  - longitud de onda en km ó m.

$f$  - frecuencia en Hertz

De la fórmula anterior se observa que a medida que - aumenta la frecuencia, se hace más pequeña la longitud de onda y viceversa.

En la sección 2.4 se encuentran las fórmulas que relacionan la longitud de transmisión para encontrar el ancho de banda de fibras ópticas ó cables coaxiales.

Las pérdidas en dB/km dependen de la longitud de onda como habíamos mencionado, pero también debido a los -- coeficientes de absorción y esparcimiento de las fibras -- que mencionaremos brevemente, debido a que mayor profundidad requeriría el empleo de fórmulas complicadas que nos haría salirnos del objetivo principal:

a) Pérdidas por esparcimiento: se deben a las variaciones en la densidad del material, fluctuaciones en su composición, estructuras heterogéneas ó defectos ocurridos durante la fabricación de la fibra.

b) Pérdidas por absorción: se deben a 3 factores: absorción por defectos atómicos en la composición del -- cristal, absorción extrínseca (impuro) por átomos impuros en el material del cristal y por absorción intrínseca --- (puro) de átomos componentes del material de la fibra.

A continuación se presentan los fundamentos de las - fibras ópticas que a manera global nos dan una idea, para seleccionar las características de las fibras, transmisiones y receptores ópticos.



## 2.6 FUNDAMENTOS DE LAS FIBRAS OPTICAS

El flujo acoplado dentro de una fibra óptica, es prevenido de escapes a través de las paredes dirigiéndolo hacia el centro de la fibra. Las bases de tal redirección es el índice de refracción.  $n_1$ , del núcleo al índice de refracción  $n_2$  del revestimiento del núcleo; dicha cubierta reduce las pérdidas por esparcimiento resultantes de discontinuidades dieléctricas en la superficie del núcleo, agrega propiedades mecánicas a la fibra y protege al núcleo de absorción de contaminantes en la superficie.

El índice de refracción, es definido como la relación de la velocidad de la luz en un medio dado a la velocidad de la luz en el vacío.

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro de diferente índice de refracción, la dirección cambia de acuerdo a la "Ley de Snell".

(Ver Figura 2.6.1.)  $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$

Es importante notar que la relación entre los ángulos es la misma, sea que el rayo incida desde el lado de alto índice ( $n_1$ ) ó desde el lado de bajo índice ( $n_2$ ).

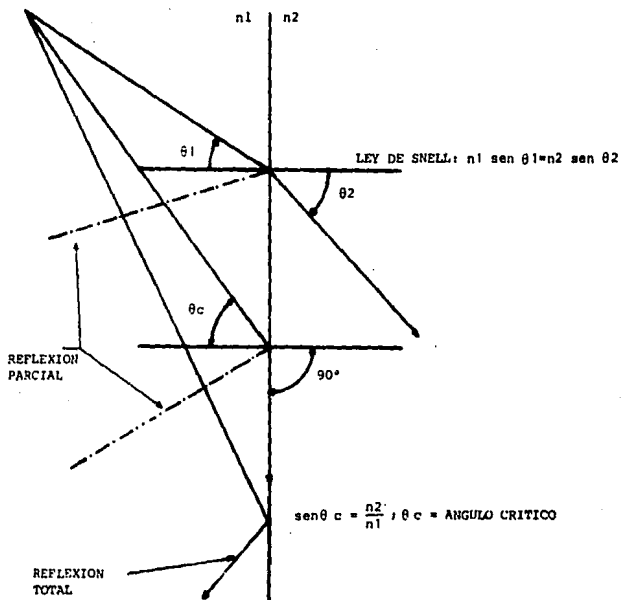


FIGURA 2.6.1.

Representación gráfica de la ley de Snell, y del ángulo crítico de reflexión.

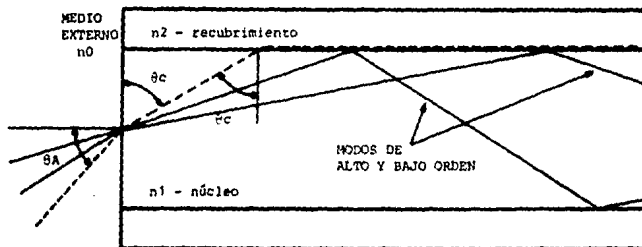
Para los rayos incidentes desde el lado de alto índice, - existe un ángulo particular de incidencia para el cual el ángulo de salida es noventa grados; también se le conoce como ángulo crítico.

Para ángulos de incidencia menor que el ángulo crítico, existe únicamente una reflexión parcial, pero para -- ángulos mayores que el crítico, el rayo es totalmente reflectado; a éste fenómeno se le llama "Reflexión interna total" (TIR).

#### 2.6.1. Apertura numérica

Los rayos que se encuentran adentro del núcleo de la fibra óptica, pueden incidir en varios ángulos, pero el - TIR se aplica como ya habíamos mencionado a ángulos mayores que el ángulo crítico. El TIR, previene que esos rayos dejen el núcleo hasta que no alcancen el fin de la fibra. En la figura 2.6.2., se muestra como el ángulo de - reflexión, en la unión entre núcleo y revestimiento, es - relacionado al ángulo al cual el rayo penetra en la superficie de la fibra. El ángulo de admisión,  $\theta_A$ , es el ángulo máximo, con respecto al eje de la fibra, al cual un rayo penetrante puede experimentar el TIR.

LEY DE SNELL  $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \theta_2$        $\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$  ;  $n_2 < n_1$



APERTURA NUMERICA

$$n_0 \text{ sen } \theta_A = n_1 \text{ sen } (90^\circ - \theta_c)$$

$$\text{N.A.} = \text{sen } \theta_A \text{ si } n_0 = 1$$

$$= n_1 \cos \theta_c$$

$$\text{N.A.} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$= n_1 \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_c}$$

para pequeños N.A.

$$= n_1 \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$$

$$= \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\text{sen } \theta_A = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1 + n_2} \sqrt{n_1 - n_2}$$

N.A. = depende principalmente de:

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

FIGURA 2.6.2.

Representación de la reflexión total interna conocida como TIR.

En lo que respecta al índice de refracción, no del medio externo, el ángulo de admisión es relacionado a los índices de refracción del núcleo y del revestimiento. Cuando el medio externo es aire (no  $\approx 1$ ), el seno del ángulo de admisión es llamado "LA APERTURA NUMERICA (N.A.)" de la fibra; ésto es:

$$N.A. = \sin \theta_A \quad (\text{ver figura 2.6.2.})$$

Existe otra manera de definir la apertura numérica ó propiedad de aceptancia de la luz en una fibra óptica.

$$N.A. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La fórmula anterior indica que la N.A. es la raíz -- cuadrada de la diferencia de cuadrados de los índices de refracción del núcleo ( $n_1$ ) y del revestimiento ( $n_2$ ).

Cuando  $n_0$  sea  $\sqrt{2}$  y  $n_1$  sea igual a 1.0 (aire), la apertura numérica, será 1.0 y todos los rayos incidentes serán atrapados. Un valor típico de la N.A. para el recubrimiento plástico de sílica fundida en las fibras ópticas es el rango de 0.25 a 0.45.

La importancia de la N.A. radica en que su valor está relacionado con el máximo ángulo con el cual todavía -

el haz de luz puede ser atrapado en el núcleo de la fibra y al cual será radiado al espacio cuando escape al final de la fibra.

Lo mostrado en la figura 2.6.2., se aplica únicamente a rayos meridionales (rayos que pasan a través del eje de la fibra); los rayos oblicuos (no meridionales), también pueden ser transmitidos, pero debido a que no se encuentran en un solo plano y se desplazan en una forma del tipo helicoidal, son más difíciles de llevar a lo largo de la fibra por la razón que no son funciones perfectas del ángulo de admisión.

### 2.6.2. Modos de Propagación

A pesar de todos los límites impuestos por la apertura numérica, los rayos pueden propagarse en varios ángulos. La propagación en pequeños ángulos con respecto al eje de la fibra, se llama "Modos de Bajo Orden", mientras que para ángulos mayores se llama "Modos de Alto Orden". Esos órdenes no existen en forma continua; a una longitud de onda dada, existe un número discreto de ángulos, donde ocurre la propagación. En las fibras ópticas monomodo resulta, cuando el área del núcleo y la N.A. son tan pequeñas, que sólo puede ocurrir un modo de propagación.

Además de los modos de alto y bajo orden, existen -- otros llamados "Modos de Escape", los cuales son atrapados como rayos oblicuos, parte de ellos en el núcleo, pero la mayoría en el revestimiento, donde ellos son llamados "Modos de Recubrimientos".

Como lo indica su nombre, en los modos de escape no se propagan los rayos tan bien como en los modos meridionales; su persistencia, dependiendo principalmente de la estructura de la fibra óptica, dan rangos desde menos de un metro de un metro hasta más de 50 metros.

La presencia de modos de escape, afectan los resultados obtenidos en la medición de N.A., pérdidas en la transmisión, haciendo a éstas demasiado altas. Por ésta razón, la N.A. se especifica usualmente en términos de EXIT N.A. (apertura numérica de salida) para fibras de una longitud adecuada, para asegurar que los modos de escape han desaparecido efectivamente. Debido a que la mayoría de la propagación en modo de escape es en el revestimiento, se puede eliminar rodeando la fibra sin cubierta con un material con un índice de refracción mucho mayor que el del revestimiento.

EXIT N.A. se define como el seno del ángulo al cual el patrón de radiación tiene un valor particular; éste

valor es normalmente 10% del valor axial máximo.

### 2.6.3. Mecanismos de Pérdidas

Los núcleos de las fibras y sus recubrimientos, aún cuando no tengan los llamados modos de escape, tienen pérdidas en la transmisión. Algunas pérdidas ya fueron tratadas anteriormente, pero los causantes son:

- Pérdidas por esparcimiento
- Pérdidas por absorción del material
- Irregularidades en la unión entre núcleo y revestimiento.
- Doblezes moleculares de la fibra óptica por la estructura del cable.

Los primeros dos mecanismos de pérdidas, dependen de la longitud de la forma que tome un rayo; el tercero depende del número de reflexiones del rayo antes de salir de la fibra. De la figura 2.6.2. observamos que los modos de alto orden, tienen formas más largas y más reflexiones que los de bajo orden. Las fibras con una apertura numérica alta, permiten la propagación en modos de alto orden, y, por tanto, tener generalmente pérdidas mayores en la transmisión. Como habíamos visto, las pérdidas en la transmisión son exponenciales y se expresan comun--



mente en decibelios por kilómetro (dB/km). La consideración de pérdidas por acoplamiento, favorece el uso de altos valores de N.A..

Los cuatro principales mecanismos de pérdidas debidos a la consideración del acoplamiento entre fibras ó entre fibras y transmisores ó receptores ópticos, ó por separación y mal alineamiento de los puertos ópticos, son:

#### 1. Apertura numérica relativa:

Las pérdidas por la apertura numérica relativa pueden ser ignoradas (ó dB) cuando la N.A. del puerto receptor -- (fibra ó detector) sea mayor que la N.A. del puerto emisor (generador de flujo ó fibra); ó sea:

$$\text{pérdidas N.A. (dB)} = 20 \log. \frac{\text{N.A. puerto emisor (fuente)}}{\text{N.A. puerto receptor}}$$

$$= \alpha NA$$

#### 2. Areas relativas:

Las pérdidas por las áreas relativas pueden ser ignoradas, siempre que el área del puerto receptor sea mayor --

que el área del puerto emisor (fuente),  $\delta$  sea:

$$\text{Pérdidas por área (dB)} = 20 \log \frac{\text{Diámetro de la fuente}}{\text{Diámetro del receptor}}$$

$$= \alpha A$$

### 3. Índice relativo gradual de los puertos ópticos:

Las pérdidas por el índice relativo gradual, pueden ignorarse, si el coeficiente de índice gradual para el -- puerto receptor es mayor que el del puerto emisor, ó sea:

$$\text{Pérdidas por índice gradual (dB)} = 10 \log \frac{1 + \frac{2}{\alpha R}}{1 + \frac{2}{\alpha S}} = \alpha I$$

donde:  $\alpha R$  = coeficiente de índice gradual en el puerto receptor.

$\alpha S$  = coeficiente de índice gradual del puerto emisor.

Los coeficientes de índice gradual se describirán -- cuando hablemos de la construcción de las fibras ópticas en otro tema.

#### 4. Pérdidas de fresnel (reflexión):

Las pérdidas de Fresnel ocurren cuando un rayo pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción. Parte del flujo es reflejado; la fracción que se transmite, se denomina transmitancia y se representa por  $\tau$ , así las pérdidas son:

$$\text{Pérdidas de Fresnel (dB)} = 10 \log \frac{1}{r} = 10 \log \frac{2 + \frac{nx}{ny} + \frac{ny}{nx}}{4}$$

donde:  $n_x$  = índice de refracción en un medio "x".

$n_y$  = índice de refracción en un medio "y".

Observamos que dichas pérdidas son iguales para cualquier sentido del rayo. Si dos fibras son unidas con un hueco de aire entre sus caras, tomando  $n_x = 1$  para el aire y  $n_y = 1.49$  para los núcleos de las fibras, las pérdidas de la fibra al aire de Fresnel son 0.17 dB. Las pérdidas del aire a la fibra son las mismas, así las pérdidas totales por el hueco de aire son de 0.34 dB. Si se hacen varias conexiones del tipo anterior, las pérdidas deberán de ser lo suficientemente altas, para que sea provechoso el uso de un medio de acoplamiento, tal como silicón, para remover el hueco de aire.

El uso de medios de acoplamiento es más significativo cuando la fibra es acoplado con fuentes como LED'S, -- compuestos de sustancias con índices de refracción de -- 3.6. Con tal índice de refracción bastante alto, el uso de un cemento epóxico, puede reducir en 1 dB las pérdidas por acoplamiento sin afectar el ángulo de admisión.

Las pérdidas de Fresnel en la superficie de emisores y receptores, pueden ignorarse a diseñar sistemas con --- conectores y acopladores, debido a que éstos ya las consideran.

#### 2.6.4. Dispersión en el tiempo de subida

Como ya se ha comentado, las limitaciones en el ancho de banda en las fibras ópticas son debidas a un fenómeno llamado "dispersión", el cual se compone de la "dispersión material" y de la "dispersión modal". Ambas están relacionadas con la velocidad de transmisión del flujo en el núcleo. La velocidad varía inversamente al índice de refracción, y si éste varía sobre el espectro de la longitud de onda de la fuente transmisora, el flujo tendrá una longitud de onda a la cual el índice de refracción es tan bajo para viajar mucho más rápido que el flujo que tenga una longitud de onda a la cual el índice es el más alto.

Así, no todas las porciones de flujo lanzadas simultáneamente, arriarán al mismo tiempo, pero deberán sopor tar la dispersión de tiempos debida a las diferencias en los tiempos de viaje.

Esta es la llamada "dispersión material". Se reduce usando fuentes de espectro angosto (como los láser) ó fi bras cuyos núcleos tengan índices de refracción que sean constantes sobre el espectro de la fuente ó emisor. En la figura anterior (2.6.2.), los rayos que se mueven para lelos al eje, viajan por un camino con una longitud que es más pequeña que los rayos que no son paralelos al eje.

Dichos rayos, propagados en modos de alto orden, ten drán un tiempo de viaje más largo que los rayos propaga-- dos en modos de bajo órden, y en que los rayos lanzados - simultáneamente sufrirán también dispersión en los tiem-- pos de llegada. Esta es la "dispersión modal". Se redu- ce disminuyendo la N.A. (ángulo de admisión más pequeño), para permitir únicamente la propagación de modos de bajo orden ó usando fibras de índice gradual.

Sea dispersión modal ó material (ó ambas), ésta es - medida aplicando un impulso, como un flujo y midiendo el ancho del pulso cuando cae 3 dB, tanto en la entrada como en la salida, en fibras lo suficientemente largas para --

exhibir una dispersión significativa. La dispersión en el tiempo se define como:

$$\frac{\Delta t}{l} \text{ (ns/km)} = \frac{1}{l} (t_{p2}^2 - t_{p1}^2)^{0.5}$$

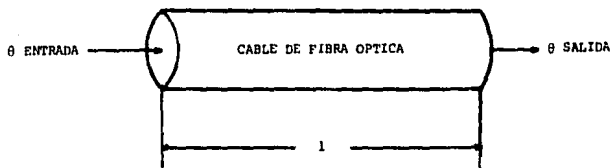
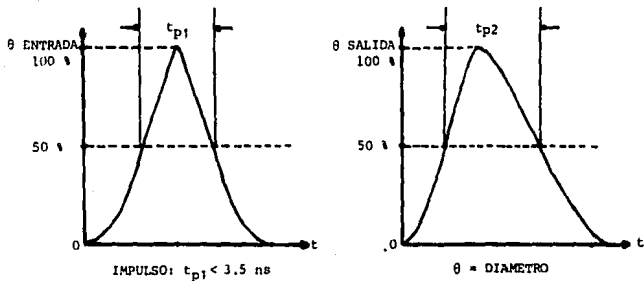
donde: "l" es la longitud (en kilómetros) de la fibra y  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  son los anchos de los pulsos cuando caen 3dB, en nanosegundos, tanto en la entrada como en la salida de la fibra. Lo anterior lo podemos ver en la figura 2.6.3..

Como la respuesta a la modulación de frecuencia de una fibra tiene una pendiente de 6 dB por octava, el efecto de la dispersión en el tiempo de subida puede también describirse en términos del producto longitud-ancho de banda:

$$\text{Ancho de banda a 3dB Longitud (Mhz.km)} = \frac{350}{\text{dispersión (ns/km)}}$$

#### 2.6.5. Presupuesto de flujo

Aunque lo referente a el llamado presupuesto de flujo podría tratarse posteriormente lo mencionamos ahora para llevar una secuencia, en lo que a fundamentos de fibras



$$\text{DISPERSION ( ns/km )} = \frac{\sqrt{t_{p2}^2 - t_{p1}^2}}{l}$$

Donde:  $l$  = longitud del cable

FIGURA 2.6.3.

Representación de la dispersión en el tiempo de subida de un impulso.

ópticas se refiere. Los conceptos concernientes a probabilidad de error, serán tratados posteriormente.

Los requerimientos de flujo para sistemas de fibras ópticas, son establecidas por las características de ruido y ancho de banda del receptor pérdidas por acoplamiento en conectores y pérdidas en la transmisión por la estructura del cable.

El nivel de flujo en el receptor deberá de ser lo suficientemente alto para que la relación señal a ruido --- (SNR) permita una probabilidad de error baja ( $P_e$ ). Existen sistemas de fibras ópticas en que las propiedades de ruido y ancho de banda de receptor permiten  $P_e < 10^{-9}$  con un flujo de entrada en el receptor de  $0,8 \mu W$ , considerando el peor de los casos . Para niveles altos de flujo,  $P_e$  es reducido.

Para el flujo requerido por el receptor (para una  $P_e$  dada), el flujo que deberá producir el transmisor está dado por la expresión para sistemas de punto a punto,

$$10 \log \left( \frac{\Phi_T}{\Phi_R} \right) = \alpha_{01} + \alpha_{TC} + \alpha_{CF} + \alpha_{ACC} + \alpha_M$$



donde:  $\alpha_T$  = es el flujo (en  $\mu W$ ) disponible en el transmisor,

$\alpha_R$  = es el flujo (en  $\mu W$ ) requerido por el receptor para una  $P_e$ .

$\alpha_0$  = es la constante de atenuación de la fibra -- (dB/km),

$l$  = es la longitud de la fibra (km).

$\alpha_{TC}$  = son las pérdidas por acoplamiento entre --- transmisor y fibra (dB),

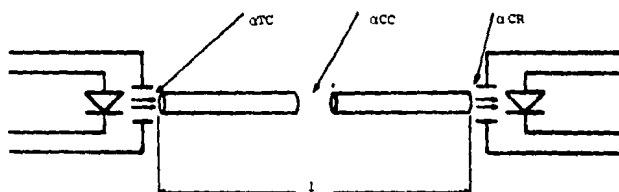
$\alpha_{CC}$  = son las pérdidas por conexiones en la línea entre una fibra y otra (dB),

$n$  = es el número de conectores en la línea  $n$ , no incluye conectores en los puertos ópticos -- (transmisores y receptores),

$\alpha_{CR}$  = son las pérdidas por acoplamiento entre fibra y receptor (dB),

$\alpha_m$  = es el margen (dB), lo escoge el diseñador, -- por el cual el flujo del transmisor excede a los requerimientos del sistema.

La ecuación anterior representa el presupuesto de -- flujo y se puede representar gráficamente en la figura -- 2.6.4.,. Como las mismas unidades (watts) son usadas para flujo y potencia, es correcto y conveniente expresar el -- flujo en "dBm":

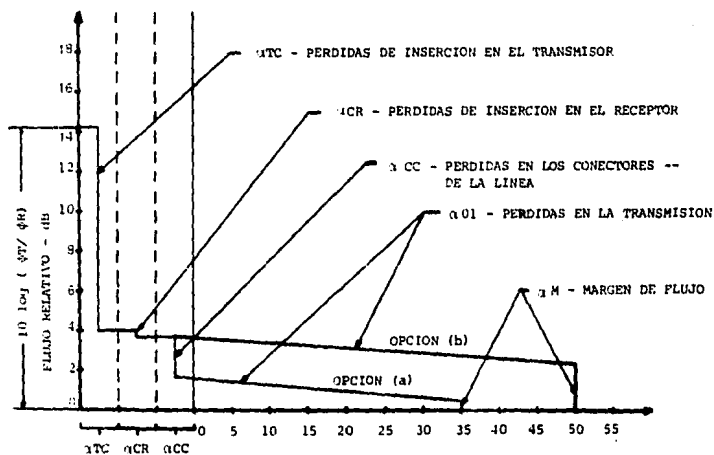


FLUJO DISPONIBLE

ET

FLUJO REQUERIDO

ER



$l$  = LONGITUD DE LA FIBRA OPTICA EN METROS.

FIGURA 2.6.4.

Representación gráfica del presupuesto de flujo

$$\varnothing \text{ (dBm)} = 10 \log \left( \frac{\varnothing \text{ (mW)}}{1 \text{ mW}} \right) = 10 \log \left( \frac{\varnothing \text{ (\mu W)}}{1000 \text{ \mu W}} \right)$$

Un ejemplo de como calcular el presupuesto de flujo para un determinado sistema es:

$$\begin{aligned} 1.- \text{ transmisor } \varnothing_T &= 44 \mu\text{W}^* \\ 2.- \text{ receptor } \varnothing_R &= 1,6 \mu\text{W}^* \end{aligned} > 10 \log \left( \frac{\varnothing_T}{\varnothing_R} \right) = 14,39 \text{ dB}$$

\* pico a pico

Suponer que el puerto óptico transmisor tiene:

N.A. = 0,5, diámetro = 200  $\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 100$

Suponer que el cable de fibra óptica tiene:

N.A. = 0,3, diámetro del núcleo = 100  $\mu\text{m}$ ;  $\alpha = 10$

NOTA:  $\alpha$  es el gradiente del índice de refracción; se analizará en el capítulo 3, aunque ya se dijo algo anteriormente.

- 3.- De las ecuaciones dadas por pérdidas en la transmisión se tiene que:

$$\alpha_{TC} = \alpha_{NA} + \alpha_A + \alpha_I$$

$$\alpha_{TC} = 20 \log \left( \frac{0.5}{0.3} \right) + 20 \log \left( \frac{200}{100} \right) + 10 \log \left( \frac{1 + \frac{2}{10}}{1 + \frac{2}{100}} \right)$$

$$\alpha_{TC} = 4.44 \text{ dB} + 6.02 \text{ dB} + 0.71 \text{ dB} = 11.17 \text{ dB}$$

Suponer que el puerto óptico receptor tiene:

$$N.A. = 0.5, \text{ diámetro} = 200 \mu\text{m}, \alpha = 10$$

- 4.- Debido a que la N.A., diámetro y  $\alpha$  del receptor son más grandes que los de la fibra, sólo permanecen --- unas pequeñas pérdidas de Fresnel, lo que hacen ---  $\alpha_{CR} = 0.17 \text{ dB}$ .

- 5.- Aplicando la ecuación de presupuesto de flujo, se obtiene el flujo permitido:

$$14.39 \text{ dB} = \alpha_{01} + 11.17 \text{ dB} + \alpha_{CC} + 0.17 \text{ dB} + \alpha_M$$

$$\alpha_{01} + \alpha_{CC} + \alpha_M = (14.39 - 11.17 - 0.17) \text{ dB} = 3.05 \text{ dB}$$

6.- Tomando en cuenta las pérdidas del cable, 2 opciones se pueden considerar:

a) Con un conector en la línea, lo cual facilita la inserción posterior de un repetidor ( $n = 1$ ). Tomando 2dB para las pérdidas de cada conector:

$$\alpha_{01} + \alpha_M = 3,05 - 2,0 = 1,05 \text{ dB}$$

Con una atenuación en el cable de 20 dB/km y una longitud de 35 metros, tenemos:

$$\alpha_M = 1,05 - (0,02 \text{ dB/m}) (35 \text{ m}) = 0,35 \text{ dB}$$

b) Sin conectores en la línea, solamente se considera una atenuación:

para una longitud de 50 metros tenemos:

$$\alpha_M = 3,05 - (0,02 \text{ dB/m}) (50 \text{ m}) = 2,05 \text{ dB}$$

El presupuesto de flujo ( $\alpha_M$ ), deberá ser siempre lo suficientemente largo para permitir la degradación de la eficiencia del flujo generado en el transmisor (LED, ---- laser). En el otro aspecto, para aprovechar los transmisores de mayor potencia,  $\alpha_M$  no deberá ser tan larga, para --

que no exceda el rango dinámico del receptor.

### 2.6.6. Rango Dinámico

El rango dinámico del receptor deberá ser lo suficientemente largo para acomodar todas las variables que están presentes en un sistema.

Por ejemplo, si los requerimientos de flexibilidad del sistema son para distancias de transmisión de 10 a 1000 metros con un cable de 12.5 dB/km y arriba de 2 conectores en la línea, el requerimiento del rango dinámico es:

$$\begin{array}{rcl}
 \alpha_{01} = 1 \text{ km} \times 12.5 \text{ dB/km} & = & 12.5 \text{ dB} \\
 n_{ACC} = 2 \times 2 \text{ dB} & = & 4.0 \text{ dB} \\
 \alpha_{\eta} & = & 3.0 \text{ dB} \\
 \text{Variaciones térmicas} & = & \underline{1.0 \text{ dB}} \quad (\text{estimado}) \\
 & & 20.5 \text{ dB}
 \end{array}$$

El tener 20.5 dB de rango dinámico más el deseo de alta sensibilidad, requieren que el receptor tenga 2 funciones importantes:

Control automático de nivel y un acoplador de c.a.,

El acoplador de c.a. deja la salida del amplificador

en un nivel fijo estable, para evitar que las pequeñas variaciones de señal alteren la salida del amplificador.

El control automático de nivel (ALC ó CAV) ajusta la ganancia del amplificador. Las pequeñas desviaciones de amplitud son amplificadas a la máxima ganancia, las altas desviaciones de amplitud son amplificadas con una ganancia tal que automáticamente son reducidas lo suficiente - para evitar saturaciones a la salida del amplificador.

La saturación afecta en los retrasos de propagación mientras que el CAV es necesario para permitir operación en alta velocidad, tan bien como si se tratara de señales con bajos niveles de operación.

## 2.7 CONCLUSIONES,

Como se pudo observar, se ha tratado de dar en este capítulo un amplio panorama de las fibras ópticas, desde la naturaleza de la luz, aspecto fundamental en el funcionamiento de las fibras ópticas, hasta los fundamentos de las fibras ópticas.

Cabe recalcar que se intentó hacer una buena comparación entre los alambres eléctricos y las fibras ópticas,

por la importancia que tiene la elección correcta al diseñar sistemas, ya que si por el puro costo del cable nos dejáramos llevar, elegiríamos actualmente al alambre eléctrico, pero que una vez analizados los aspectos mencionados en éste capítulo, cambiaremos en algunos casos a las fibras ópticas.

También se analizaron las bases para el funcionamiento de las fibras ópticas (naturaleza de la luz) y sus --- principales conceptos, básicos cuando se pretenda diseñar sistemas.

En el capítulo III se da todo lo concerniente a los cables de fibras ópticas, tratándolos ya como partes de sistemas de redes de información.



### III. TECNOLOGIAS DE LOS CABLES DE FIBRAS OPTICAS

#### 3.1 CABLES DE FIBRAS OPTICAS

A lo largo de éste capítulo se tratará todo lo referente a los cables de fibras ópticas, así como sus características, diseño, instalación, etc..

##### 3.1.1. Consideraciones en el diseño de cables

El diseño final del sistema a instalar determinará -- el tipo y número de fibras que se deben tener en cada cable.

Una vez seleccionado, debe considerarse la protección de las fibras con el fin de instalarlas en un determinado lugar, evitando que tengan daños ó alteren sus características de transmisión.

Para el diseño se debe tomar en cuenta los factores mecánicos que afectan al cable como son: alargamientos, dobleces, vibraciones ó aplastamientos durante la fabricación, instalación y operación.

Así mismo, la fibra debe ser protegida contra efectos ambientales, debidos a variaciones de temperatura, humedad ó relámpagos. Algunos de los problemas anteriores se discutirán brevemente.

**-Microdobleces:**

Los cables de fibras ópticas no deben ser excesivamente doblados; casi siempre los pequeños dobleces causan incrementos en las pérdidas, debido al escape de luz del núcleo de la fibra por lo que el radio de curvatura del cable deberá ser tan grande como sea posible. (Ver tema 2.5)

**-Humedad:**

Si la fibra no es protegida contra la humedad, existirá corrosión cuando la misma esté bajo tensión.

**-Elección del Material:**

Es un aspecto fundamental la elección del material adecuado en el diseño del cable. Algunos materiales tienen una expansión térmica de 10 a 100 veces mayor que la nominal de la fibra. Esto significa que entre los rangos de baja a alta temperatura, ésta puede comprimirse ó estirarse dentro de ciertos límites de tolerancias, causando microdobles y pérdidas de radiación.

**-Protección Mecánica de la Fibra:**

La protección puede ser de 2 tipos:

- a) **Revestimiento primario** - es el que forma el núcleo y se constituye de un hule silicón y protege mecánicamente al cable durante todos los pasos de fabricación. El diámetro típico de una fibra con revestimiento de hule silicón es de 350  $\mu\text{m}$ .
- b) **Protección secundaria** - puede ser firme u holgada. La protección secundaria firme es hecha por el proceso de extrusión de un material termoplástico directamente sobre la fibra. Usualmente el diámetro exterior es de aproximadamente 0.9 mm. El tubo es pro-

tegado con un repelente al agua para protección contra la humedad.

### 3.1.2. Cables

Los cables de fibras ópticas se pueden dividir en 2 grupos principales para su estudio: cables metálicos y no metálicos. Dentro de ambos grupos existen cables para -- instalarse en ductos, túneles, directamente enterrados, - submarinos. Se tratarán 3 tipos de cables: cables para teléfono con componentes metálicos, cables no metálicos - para uso rudo y cables para transmisión en cadena de in-- formación.

#### 1.- Cables para telefonía con componentes metálicos.

Los cables de éste tipo se usan en áreas urbanas y se prefieren a los cables no metálicos, debido a su bajo costo.

##### 1.1 Diseño del cable:

El cable se construye por fibras concéntricas con - centro de refuerzo, el cual es acero de aproximadamente 2.0 mm. de diámetro; el acero puede aprovecharse para di sipar la temperatura, lo cual evitará expansión de las - partes plásticas. Cada fibra con todo y su recubrimien- to, está provista de una protección adicional por un tu-

ho de plástico. La relación entre los diámetros exteriores del refuerzo de acero y las fibras aplicadas alrededor del tubo decide el máximo número de fibras en el cable.

Una cinta de poliéster reúne al conjunto de fibras y también se cubre el cable con polietileno conteniendo papel metálico en su interior, con el objeto de formar una barrera a la humedad y como estabilizador de temperatura.

### 1.2 Resultados:

La atenuación para cables reunidos concéntricamente es menor a 3.5 dB/km a 850 mm. de longitud de onda. La atenuación se incrementa debido al cableado y al paso de reunido, en 0.2 dB/km aproximadamente. En lo referente a la temperatura se ha comprobado su uso aceptable para temperaturas de -40°C a 80°C. El ancho de banda se ve es casamente afectado con las variaciones de temperatura.

### 1.3 Instalación:

Estos cables son usados en instalaciones de redes urbanas como túneles ó ductos. Si los cables se van a instalar en lugares con piedras ó ásperos, se tendrá que cubrir el cable con armaduras metálicas aplicadas helicoidalmente, lo que también les permite instalarlos como cables aéreos con distancia entre postes de 100 m..

## 2.- Cables no metálicos.

Los cables no metálicos se prefieren para instalarse directamente bajo tierra ó como cables aéreos en zonas rurales ó cables en zonas de muchos relámpagos ó con lugares que tienen una resistencia alta en la tierra.

La estructura central en vez de ser de acero es de fibra de vidrio reforzada con poliéster. Estos tipos de cables normalmente se forman de 2 a 6 fibras para aplicaciones de uso rudo.

### 2.1 Diseño del cable:

El cable se construye de manera similar a los cables convencionales de fibras ópticas, con la diferencia que no se usan pantallas metálicas, para asegurar bajo peso y pequeñas dimensiones, las fibras llevan un escaso recubrimiento de poliéster ó nylon. Un recubrimiento secundario provee mejor protección contra la penetración de agua y reducir la sensibilidad a vibraciones mecánicas. La cubierta se hace de material suave, resistente a la flama y a la abrasión; como poliuretano.

Los requerimientos mecánicos para soportar tensión, compresión ó torsión son muy estrictos dentro de un ancho rango de temperatura. El peso aproximado en cables de 6 fibras con 7 mm. de diámetro externo es de 36 Kg./Km..

Los cables de 2 fibras con un diámetro de 4 mm. pesan --  
14 Kg/Km..

### 3.- Cables para transmisión en cadena de información.

Los encadenamientos digitales requieren de un cable compacto que excluyan componentes metálicos conteniendo una sola fibra. El sistema puede operarse en modo simplex ó duplex arriba de 20 Mbits/s a 10 MHz en transmisión de video sobre unos kilómetros. Estos cables se ins talan en ambientes industriales cerrados ó en lugares en el medio ambiente con protección. Estos cables son los que se instalan junto a los hilos de guarda de las líneas de transmisión, por ésto debe soportar esfuerzos de tensión y permitir un pequeño radio de curvatura de 25-50mm.

#### 3.1 Diseño del cable:

El cable tiene un revestimiento de poliéster, permitiendo un pequeño tamaño que reduce las vibraciones y la sensibilidad a microdobles. La cubierta de poliuretano es resistente a la flama, lo que facilita su instalación en lugares industriales.

### 3.2 Resultados:

La mayor importancia de éstos cables es la estabilidad térmica y resistencia a la tensión mecánica.

Existen 3 pruebas importantes a éstos cables:

- ciclo de temperaturas
- dobléz
- impacto

En la figura 3.1 se muestra la atenuación de un cable para rangos de temperatura de 30°C a 185°C, siendo de 0.5 dB/Km. Las pruebas se realizan doblando al cable --- 50.000 veces en el mismo sitio para observar si cambia -- sus características.

### 3.2 CARACTERISTICAS DE LOS TIPOS DE FIBRAS.

Las fibras son usadas para los sistemas de comunicación ópticos como "guíaondas" y se hacen de dieléctricos transparentes cuya función es guiar la luz visible e infraroja sobre largas distancias. Cabe recordar que en el capítulo anterior se establecieron las bases de la teoría de la luz que son importantes en éste capítulo.

Las fibras "guíaondas" tienen forma cilíndrica gene-



ATENUACION  
PARA 850 nm db/km

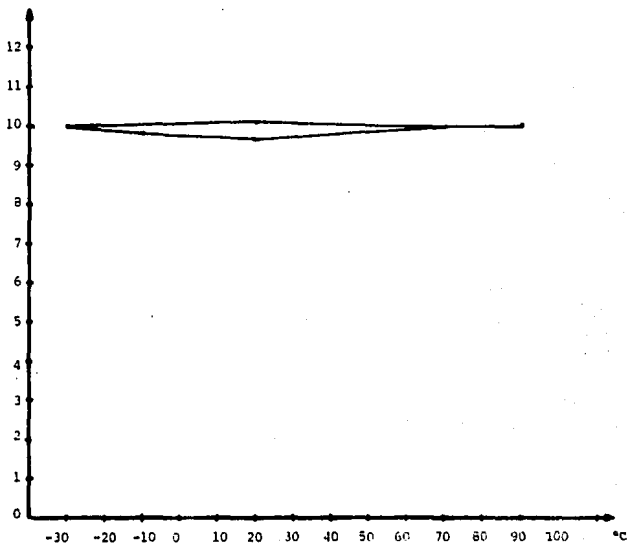


FIGURA 3.1.1.

Atenuación del cable como función de la temperatura.

ralmente como ya tratamos, la fibra confina la energía -- electromagnética en forma de luz dentro de su superficie y la guía en dirección paralela al eje de la fibra.

Las propiedades de transmisión de un guíafondas óptico son establecidas por sus características estructurales, que tienen un efecto determinante en la señal, pudiendo - causar distorsiones indeseables a lo largo de la fibra. La estructura establece la capacidad de transmisión de in formación de la fibra y también influye en la respuesta a perturbaciones ambientales.

Las fibras ópticas pueden clasificarse en términos - del índice de refracción del núcleo, sea de un modo (fi-- bra monamodo) ó de muchos modos (fibras multimodo).

Si el núcleo, que está hecho de sílice, tiene un índice de refracción  $n_1$  "uniforme", se llama fibra de índice escalonado, y cuando cae, tiene un cambio abrupto, a - manera semejante a la función escalón unitario.

Si el núcleo no tiene un índice de refracción unifor me, que decrece gradualmente desde el centro hacia la interfase entre el núcleo y el revestimiento, se llama fibra de índice graduado.

Tanto las fibras de índice escalonado como gradual se dividen en tipos monomodo ó multimodo. Las fibras multimodo ofrecen varias ventajas comparadas con las monomodo.

El mayor radio del núcleo de las fibras multimodo permite lanzar la potencia óptica dentro de la fibra y facilitar la conexión con fibras similares. Otra ventaja es que la luz puede lanzarse en una fibra multimodo, usando una fuente emisora de luz (LED), mientras que las fibras monomodo tienen que ser excitadas con láser, lo que implica mayor costo y menor vida para la fuente de láser que la que tendría un LED.

Una desventaja de las fibras multimodo es que pueden sufrir dispersión intermodal: cuando un pulso se lanza en una fibra, la potencia óptica en el pulso es distribuida sobre todos los modos de la fibra, que al recibir diferente potencia viajarán a diferente velocidad, causando que unos pulsos lleguen antes que otros distorsionando la información.

Esta dispersión intermodal se reduce usando fibras de índice gradual, que también permiten mayores anchos de banda (mayores capacidades de información) que las fibras de índice escalonado.

En la figura 3.2.1. se muestra una tabla de gran importancia en lo que se refiere a las características de las fibras, pues contiene las aplicaciones, tamaños, anchos de banda, etc., que son determinantes para el correcto funcionamiento de un determinado sistema de información.

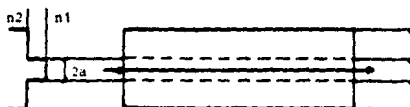
### 3.3 CONSTRUCCION DE CABLES DE FIBRAS OPTICAS.

Existen distintos tipos de cables de fibras ópticas, tanto en construcción como en materiales. Cables de 3 ó 4 conductores, se usan cuando se requiere transmitir información analógica y digital; cables de 1 conductor para transmisiones unidireccionales ó cables dobles para transmisión duplex, son ejemplos de algunas construcciones típicas. También se tienen construcciones del tipo 3 x 70, ésto es 3 cables con 70 fibras cada uno bajo una cubierta común, aplicables en enlaces entre centrales telefónicas ó sistemas televisivos.

La construcción del cable depende principalmente del uso que se le vaya a dar:

- cables para conductos
- cables aéreos
- cables enterrados
- cables metálicos, dieléctricos ó mistos

## FIBRA MONOMODO

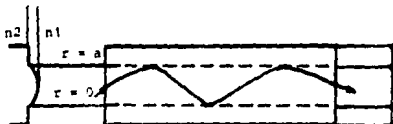


REVESTIMIENTO 125  $\mu\text{m}$   
 NUCLEO 8-12  $\mu\text{m}$

$$n1 = 1.460$$

$$n2 = 1.457$$

## FIBRA MULTIMODO DE INDICE GRADUADO

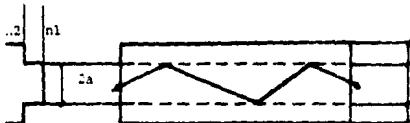


REVESTIMIENTO 125  $\mu\text{m}$   
 NUCLEO 50  $\mu\text{m}$

$$n1 = 1.470$$

$$n2 = 1.455$$

## FIBRA MULTIMODO DE INDICE ESCALONADO



REVESTIMIENTO 125-400  $\mu\text{m}$   
 NUCLEO 50-200  $\mu\text{m}$

$$n1 = 1.470$$

$$n2 = 1.455$$

	FIBRA MONOMODO INDICE ESCALONADO	FIBRA MULTIMODO INDICE GRADUAL	FIBRA MULTIMODO INDICE ESCALONADO
FUENTE EMISORA	LASER	LED O LASER	LED O LASER
APLICACION	TELECOMUNICACIONES DE LARGAS DISTANCIAS -- SUBMARINAS	SISTEMAS TRONCALES -- ENTRE CENTRALES TELE- FONICAS	TRANSMISION EN CADA- NA DE INFORMACION
BW	> 30 GHz	300MHz-km a 1GHz-km	= 10 MHz
N.A.	0.1	0.2	0.25 - 0.4
PERDIDAS dB/km	A 1300 nm 0.5 dB/km	A 850 nm 3 dB/km	A 850 nm 2-3 dB/km
COSTO	BARATO	CARO	MUY CARO
EMPALMES	MUY DIFICIL	REGULAR	REGULAR

FIGURA 3.2.1.

Características y comparación entre las fibras monomodo y multimodo.

- Cables para transmisión de información en hilos de guarda.

La construcción común en cables de fibras ópticas es la siguiente:

La fibra se fabrica con sílice, con un revestimiento del mismo material y posteriormente una cubierta de silicón; ésto es la parte básica, después se agregan los elementos de refuerzo: refuerzo de Kevlar en colores, cuando se tienen 2 ó más conductores para identificación, armadura metálica con hilos de acero aplicados helicoidalmente (en caso de ser aéreo ó en los hilos de guarda de un sistema de transmisión) y cubierta exterior de poliuretano,

En algunos otros casos las fibras necesarias 7, 19, 37, etc., se reúnen helicoidalmente, sobre ellas se les aplica una cinta reunidora de aluminio, una cubierta de policloruro de polivinilo (PVC) y una cubierta exterior de poliuretano. Es importante el distinguir con colores las fibras para identificarlas durante la instalación y mantenimiento.

Las construcciones más normales son las llamadas con céntricas en las que se aplican ó reúnen fibras alrededor de una central (que puede ser fibra ó miembro de refuerzo

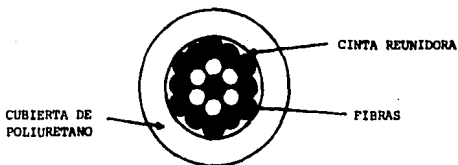
de acero) en múltiplos de 6; esto es 6 fibras en la primera capa, 12 en la segunda, 18 en la tercera, etc., identificadas en colores, como se ve en la figura 3.3.1..

El objeto de las cubiertas es proteger al cable contra la humedad, rasgaduras ó aplastamientos, motivo por el cual dependiendo del uso que se le vaya a dar al cable, éste tendrá que ser sometido a severas pruebas de tensión, flexión, doblado, compresión, impacto y torsión, debiendo cumplir con determinados valores establecidos por normas.

Aunque posteriormente se detallará más la construcción de los cables de fibras ópticas instalados dentro de los hilos de guarda, se muestran los datos de una hoja técnica de un cable con 1 fibra óptica con 6 alambres de acero cubiertos con aluminio para evitar corrosión, el objeto de los alambres de acero es el de funcionar como hilos de guarda de las líneas de transmisión, mientras que el cable óptico sirve como enlace entre computadoras ó comunicaciones entre subestaciones.

### 3.4 PRUEBAS MECANICAS A LOS CABLES DE FIBRAS OPTICAS.

Todo cable sea del tipo que sea, tiene que pasar determinadas pruebas reglamentadas por Normas Internaciona-



• TOTAL DE FIBRAS

1  
7  
19  
37  
61

FIGURA 3.3.1.

Construcción concéntrica de un cable de fibras ópticas.

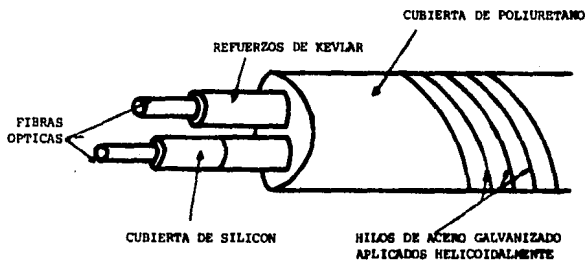
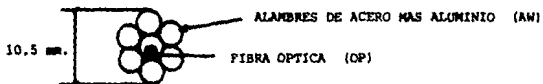


FIGURA 3.3.2.

Construcción típica de un cable de fibra óptica con uso en líneas de transmisión.





CALIBRE DEL CONDUCTOR	65 mm <sup>2</sup>
CONSTRUCCION	6 AW + 1 OP / 2.0 mm.
SECCION TRANSVERSAL	64.5 mm <sup>2</sup>
DIAMETRO EXTERIOR	10.5 mm
PESO:	Al + ACERO 415 kg/km AW
	TOTAL AW + OP 425 kg/km AW + OP
CARGA DE RUPTURA	7290 kg.
RESISTENCIA CD A 20°C	1.12 Ω/km
MODULO DE ELASTICIDAD	1600 kg/mm <sup>2</sup>

FIGURA 3.3.3.

Hoja técnica de un cable típico de fibra óptica para funcionar como transmisor - hilo de guarda en una línea de transmisión aérea.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA<sup>9</sup>

les, que se establecen según las condiciones a las que va a ser expuesto el cable.

Entre más riesgoso ó crítico vaya a ser el funcionamiento del cable, más rigurosas serán las pruebas. Aunque aquí se tratará de pruebas mecánicas, también se le realizan pruebas electrónicas durante y después de las pruebas mecánicas con el objeto de checar atenuación, longitud de onda, etc..

#### 3.4.1. Prueba de Torsión

El cable de fibras ópticas es expuesto a muchos ciclos de torsión con un determinado ángulo y número de torsiones, siendo éstas función de la aplicación que vaya a tener el cable y la norma con la que se esté probando,

Para que sea satisfactoria la prueba, ninguna fibra debe de romperse, ya que con una que sufra desperfectos, el cable ya no servirá.

#### 3.4.2. Prueba de Compresión

Esta consiste en probar el aplastamiento y la resistencia al esfuerzo cortante debidas a diferentes presiones, si la atenuación no aumenta considerablemente, el ca

ble pasa la inspección. La prueba de esfuerzo cortante es importante en el caso de instalación en lugares con suelo áspero.

### 3.4.3. Prueba de Resistencia al Impacto

Esta prueba consiste en colocar el cable sobre una superficie dura (acero), exponiéndolo continuamente a un martillo desde diferentes alturas con el fin de observar su resistencia a impactos variables: después de un determinado número de impactos, el cable debe trabajar satisfactoriamente para que la prueba se considere aceptada.

### 3.4.4. Prueba de Doblez

Como se ha comentado es importante considerar el radio mínimo de curvatura ó de doblez del cable sin que se dañen algunas fibras. Al realizar esta prueba se conecta el cable a un medidor de atenuación, la cual se está midiendo constantemente mientras el cable se enrolla alrededor de un mandril de diferentes diámetros, bajo cierto esfuerzo de tensión. Cuando la atenuación empieza a decrecer quiere decir que el cable está a punto de romperse y por tanto se mide el radio del mandril en ese punto, lo cual representará el radio mínimo de curvatura permitido.

#### 3.4.5. Prueba de Flexión

Por medio de un tipo de poleas (polipasto) se hace pasar el cable, el cual se mueve hacia adelante y hacia atrás con un peso en un extremo. Esta prueba simula la actuación del cable cuando se está instalando en los ductos. Se determinan el número de vueltas alcanzadas por el cable antes de que alguna fibra se rompa, con un número de poleas y un esfuerzo de tensión dado.

#### 3.4.6. Prueba de Tensión

El objeto de esta prueba es determinar el mayor esfuerzo de tensión que se le puede aplicar a un cable sin producir una ruptura en alguna fibra. La atenuación se mide para ayudar a determinar la máxima tensión que se puede aplicar a una fibra.

Es importante hacer notar que no todos los cables tendrán que pasar por las pruebas anteriores; según sea la aplicación del cable y las condiciones de instalación y funcionamiento, algunos pasarán por las pruebas anteriores y otros por algunas solamente.

### 3.5 INSTALACION DE CABLES DE FIBRAS OPTICAS.

La instalación de cables de fibras ópticas se realiza de manera análoga a los cables telefónicos ó eléctricos convencionales. El menor diámetro y peso de los cables de fibras ópticas facilitan su instalación, pues en un tubo se pueden llevar cientos de fibras ópticas ocupando un pequeño espacio comparadas con un sistema de igual capacidad conteniendo cables tradicionales.

Los métodos, herramientas y equipos usados en la instalación de cables de cobre, pueden usarse en la mayoría de los casos para los cables de fibras ópticas.

En el punto 3.3 se presentó una hoja técnica de un determinado cable de fibra óptica; las consideraciones de radio mínimo de curvatura, esfuerzo de tensión, etc., deben cumplirse durante la instalación del cable para evitar que éste se dañe. A manera de datos, recordemos lo que mencionamos anteriormente acerca del radio de curvatura, que debía ser de 10 a 20 veces el diámetro exterior del cable. Un esfuerzo de tensión típico a un cable de fibra óptica es de 1 KN y para uno igual, pero con armadura metálica es de 4 KN.

Un factor de alta Ingeniería es el de minimizar la ruta de instalación del cable, que aunque actualmente se fabrican longitudes de 1000 m. ó 1500 m. sin empalmes, siempre es conveniente reducir el costo de un determinado proyecto.

En la tabla de la página 84 se muestra una comparación de la instalación de diferentes tipos de cables y con el costo de la mano de obra únicamente a razón de \$ 2,000.00 día-hombre y sin considerar otro tipo de costos como transportes, precio del cable, imprevistos, etc..

Nótese el costo para 300 m., de cable coaxial y para 1000 m. de cable de fibras ópticas, lo que no deja opción y da la gran ventaja que representan las fibras ópticas.

A continuación se describen brevemente los tipos de instalación a que son sujetos los cables de fibras ópticas.

### 3.5.1. Instalación en Ductos

Debe ser colocado el cable de fibra óptica en las tuberías tipo conduit para evitar que se mueva y no obstruya futuras instalaciones. En casos excepcionales de cortas distancias de conexión, los cables ópticos pueden ir en el mismo tubo de cables de cobre. Una forma de reducir cos--

TIPO DE CABLE	A	B	C	D	E	F	G*	H		
								I	J	K
Coaxial, 6 tubos cubierta plomo	43	300	532	43	18 28	71	\$142,000.00	26600	5262	31862
Coaxial, 6 tubos cubierta alum.	53	300	209	43	18 28	71	\$142,000.00	10400	8280	18680
Cable óptico con 6 fibras	11	1000	10	8	7 7	15	\$ 30,000.00	500	417	917

\* Costos aproximados calculados a Septiembre de 1985.

A = Ø (mm)

B = longitud (m)

C = Peso kg/100 m.

D = Instalación días-hombre

E = Empalmes número / días-hombre

F = Total días-hombre

G = Costo total días-hombre

H = Peso total de transporte (kg)

I = Cable

J = Carretes

K = Total

tos de instalación es el de colocar subductos de PVC en los ductos de concreto.

### 3.5.2. Instalación de Cables Aéreos

Los cables aéreos pueden tener un centro de refuerzo para instalarse directamente, ó depender de un alambre externo de suspensión. Los cables con refuerzo se instalan a semejanza de los de cobre, mientras que los que llevan refuerzo externo tienen menos dificultades en instalación pues no requieren tanto equipo. Es importante el cálculo de la catemaria y de la distancia entre postes, que en el caso de cables de fibras ópticas es bastante grande.

### 3.5.3. Cables Directamente Enterrados

Estos cables deben protegerse contra rasgaduras, cortes y aplastamientos, así como contar con armaduras de --acero para protección contra roedores. Es importante limpiar la zanja donde se va a instalar el cable y por medio de maquinaria evitar lo más posible las rocas puntiagudas.

### 3.5.4. Instalación de Cables en Interiores

La característica de los cables instalados en inte--riores es que deben tener sustancias retardantes a la fla



ma ó antifiama para evitar incendios. Al planear la ruta de instalación, deberá, evitarse los dobleces excesivos, así como pasar cerca de la instalación eléctrica. Esta - instalación es usual en grandes edificios para interco--- nexión de teléfonos ó con un número grande de terminales.

### 3.6 CONCLUSIONES.

Ha sido muy significativo el explicar en algunos casos por medio de tablas las características de los cables de fibras ópticas, sobre todo para tratar de formar el cri terio correcto, cuando se trate de elegir un determinado - cable para una aplicación específica. Aquí se incluye el elegir una fibra monomodo ó multimodo, el tipo de instalación, ruta, etc., como mejor medio para lograr la instalación óptima y el menor costo posible.

Un aspecto fundamental es el de saber interpretar correctamente las hojas técnicas de los diferentes tipos de cables, así como conocer el tipo de pruebas necesarias de la aplicación a que vaya a ser expuesto el cable.

Por último se trató el aspecto que puede hacer elegir un cable, de fibras ópticas a uno de cobre ó coaxial; el costo de instalación, así como el tiempo, el cual es en algunos casos 6 veces menor así como en costo.

## IV. ASPECTO GENERAL DE LAS COMUNICACIONES POR FIBRAS -- OPTICAS

### 4.1 ANTECEDENTES.

A manera general se pueden ver en la figura 4.1.1. -- los elementos fundamentales de un sistema de comunicación aplicados en el caso de una llamada telefónica entre dos - usuarios; posteriormente describiremos el diagrama de bloques de los sistemas normales de comunicación.

En los elementos anteriores se incluye una fuente de información, la cual pone un mensaje en el transmisor, acoplándolo en el canal de transmisión en forma de una señal de pulsos, que realiza las propiedades de transferencia del canal.

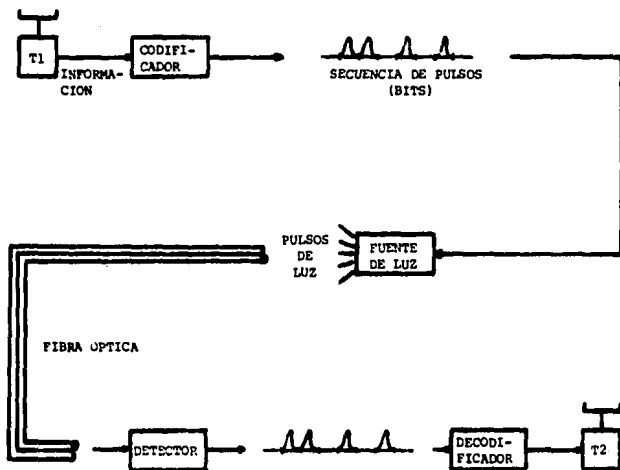


FIGURA 4.1.1.

Sistema óptico de comunicación mostrando una llamada telefónica.

El canal es el medio de enlace entre el transmisor y el receptor, puede ser una línea de transmisión guiada, - tal como un alambre ó una fibra óptica (fig. 4.1.1.) ó -- sin una guía definida como la atmósfera ó el espacio,

Cuando la señal va pasando por el canal, se va atenuando y distorsionando progresivamente a medida que aumenta la distancia.

Por ejemplo, así como la potencia eléctrica se pierde por la generación de calor a medida que la señal eléctrica fluye a lo largo del alambre, la potencia óptica es atenuada por absorción y esparcimiento de moléculas en el canal. El objeto del receptor (decodificador + amplificador) es extraer la señal distorsionada del canal, amplificarla y restaurarla a su forma original antes de recibirse la información ó el mensaje.

Aunque en la figura 4.1.1. se mostró un sistema telefónico óptico, todos los sistemas de comunicación se componen básicamente de los mismos componentes como analizaremos posteriormente.

#### 4.2 FORMAS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACION.

Antes de dar las formas que tienen los sistemas de comunicación, sería conveniente dar el progreso a través de los años de la fibra óptica en sí, en cuanto a pérdidas se refiere; en la gráfica 4.2.1., podemos observar la disminución de pérdidas (atenuación) de los cables de fibras ópticas que representan uno de los principales elementos de los modernos sistemas de comunicación.

El principal objetivo que se presenta cuando se requiere modernizar un determinado sistema de comunicación es el de mejorar la fidelidad de la transmisión, incrementar la cantidad de información que se pueda enviar al mismo tiempo ó el de aumentar la distancia de transmisión entre las estaciones repetidoras, las cuales se tratan de evitar.

Los primeros sistemas de comunicación tenían poca capacidad de transmisión de información y eran medios como lámparas de señales ó fogatas.

Cuando se desarrollaron sistemas más modernos se tenía que limitar la velocidad de transmisión a la percepción del ojo, el cual era usado como receptor. Aquí fue donde surge el alambre eléctrico como medio de transmisión

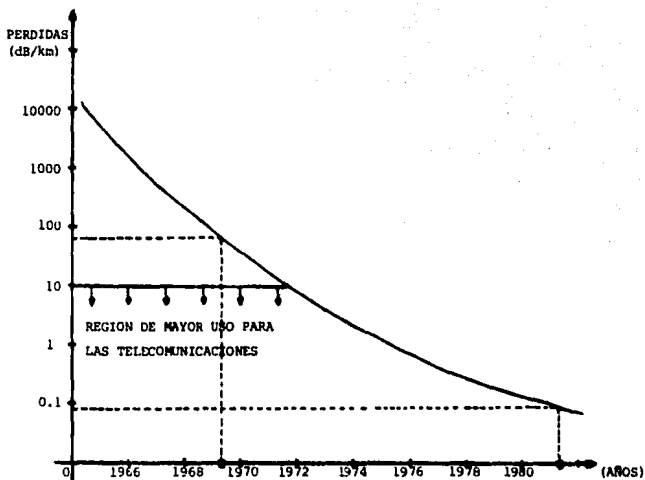


FIGURA 4.2.1.

Gráfica del proceso de fabricación de fibras ópticas.

de energía eléctrica y señales; pero cuando se descubre - la región de onda larga del espectro electromagnético, se utiliza para llevar información de un sitio a otro.

Lo anterior surge debido a la posibilidad de transmitir los datos sobre el canal de comunicación superponiendo la señal de información en una senoide, variando la onda electromagnética conocida como portadora. En el receptor, se remueve la información de la portadora para procesarla e interpretarla.

Debido a que la cantidad de información que puede -- ser transmitida está directamente relacionada al rango de frecuencias en que la onda portadora puede operar, incrementando la frecuencia de la portadora se puede incrementar el ancho de banda de la transmisión y por tanto aumentar la capacidad de información. Por lo tanto, la tendencia en las comunicaciones es el de emplear progresivamente mayores frecuencias (longitudes de onda cortas), que - ofrecen un incremento en el ancho de banda y por tanto un aumento en la capacidad de información, dando lugar al nacimiento del radar, televisión y microondas.

En la figura 4.2.2. se muestra el espectro electro--magnético, así como sus usos en las comunicaciones y medios de transmisión como alambres eléctricos, BC (banda -



f (Hz)	APLICACION	MEDIO DE TRANSMISION	TIPO	LONG. DE ONDA
10 <sup>15</sup>	TELEFONO EXPERIMENTAL DATOS VIDEO	RAYOS LASER	FIBRAS OPTICAS	ULTRAVIOLETA
				VISIBLE
				INFRAROJO
10 <sup>14</sup>				10 m
100 G	NAVEGACION SATELITES	RADIO DE	GUIAONDAS	ONDAS MILIMETRICAS
10 G	RADAR MICROONDAS	MICROONDAS		SHF
1 G				10 cm.
100 M	TV - UHF	RADIO DE ONDA	CABLE	UHF
	AERONAVES			VHF
	VHF, TV, FM			
	RADIO			1 m.
10 M	RADIO BANDA CIVIL	CORTA	COAXIAL	HF
				100 m.
1 M	GUADACOSTAS	RADIO DE ONDA	PARES DE ALAMBRES	MF
100 K	CABLE SUBMARINO RADIO TRANSOCEANICO	LARGA		LF
				10 km.
10 K				VLF
				100 km.
1 K	TELEFONO TELEGRAFO	X		AUDIC

FIGURA 4.2.2.

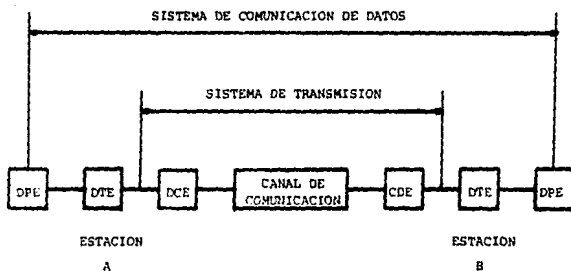
Espectro electromagnético mostrando los medios de comunicación más usuales.

civil), radio AM y FM, televisión, etc..

También se muestra la región óptica que usa rangos de longitud de onda de 50 nm (ultravioleta) a 100  $\mu$ m (infrarojo). Debido a que las frecuencias ópticas son del orden de  $5 \times 10^{14}$  Hertz, el láser tiene una capacidad de información excedente a los sistemas de microondas por un factor de  $10^5$ , que representa 10 millones de canales telefónicos, que junto con el moderno desarrollo de los emisores y receptores ópticos dan a los sistemas ópticos una gran ventaja sobre los tradicionales.

#### 4.3 ELEMENTOS DE LA TRANSMISION EN CADENA POR FIBRAS OPTICAS,

A menudo es necesario transmitir información digital entre módulos que están físicamente separados y que pueden tener diferencias significantes de voltaje entre sus puntos comunes. De la separación física nace el problema de las limitaciones del ancho de banda y las diferencias de voltaje pueden ser lo suficientemente grandes para causar errores en la transmisión de datos o presentar peligro para el personal de mantenimiento así como para el mismo equipo.



DPE = EQUIPO DE PROCESAMIENTO DE DATOS

DTE = EQUIPO TERMINAL DE DATOS.

DCE = EQUIPO DE COMUNICACION DE DATOS.

FIGURA 4.3.1.

Diagrama de bloques detallado de un sistema típico de comunicación.

Un diagrama de bloques más detallado de un sistema de comunicación se muestra en la figura 4.3.1..

Cada bloque de la figura anterior puede contener más de un elemento. Por ejemplo el canal de comunicación -- (por fibras ópticas), puede ser bidireccional ó una unión en cadena múltiples pasos como serían elementos DCE de estaciones adicionales. Dentro de cada estación pueden -- existir varios elementos del tipo DCE, DTE, ó DPE.

El DPE es el "usuario" del sistema de comunicación, ya sea dando ó requiriendo datos por transmitir. El DTE realiza el interfase eléctrico entre el DPE y el DCE; adicionalmente de proveer las señales a los puertos, las cuales son compatibles eléctrica y mecánicamente con los requerimientos del DCE, el DTE también realiza parte de la codificación, formateo, prioridades y tiempos de los datos.

El DCE realiza la interfase entre los puertos eléctricos del DTE y los requerimientos mecánicos, ópticos -- y/ó ópticos del Canal ó Línea de Comunicación, la cual es tá formada por fibras ópticas.

Los requerimientos del protocolo en un sistema de comunicación son representados en la figura 4.3.2. por lí--

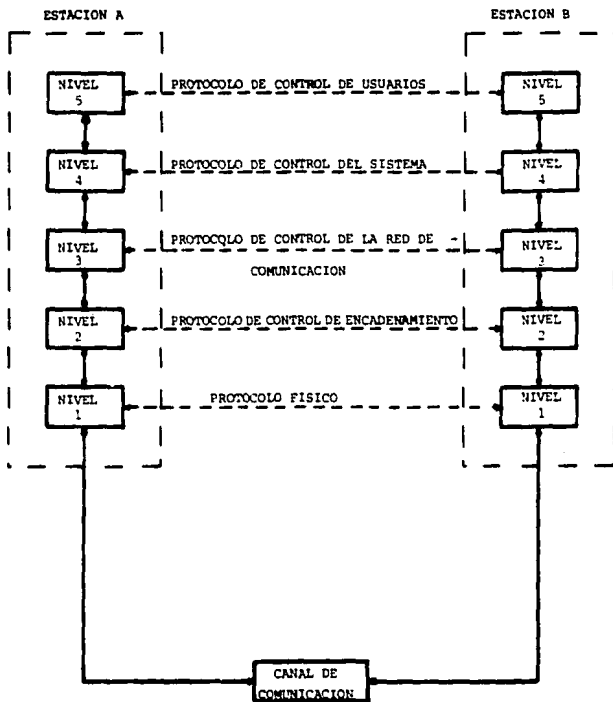


FIGURA 4.1.2.

Requerimientos de protocolo para un sistema de comunicación.

neas punteadas que describen pasos implícitos. Los pasos principales son por el Canal de Comunicación, pero para hacer que los datos por transmitir aparezcan en el otro lado del canal en la misma forma y con el tiempo requerido y prioridad, es necesario un intercambio de información en todos los niveles mostrados.

El protocolo físico envuelve la codificación y el tiempo correctos, el Control en Cadena gobierna la preparación para la transmisión. Estos son los llamados niveles bajos y los encontramos en el elemento DCE.

Los niveles altos de protocolo son los restantes y se encuentran en los elementos DTE y DPE.

Ahora se procederá a detallar dos aspectos fundamentales en los sistemas de comunicación:

- Los elementos que forman la transmisión en cadena por fibras ópticas, que son el detalle de los bloques de la figura 4.3.1. y

- Los arreglos más típicos de sistemas, que se mencionarán en capítulos subsecuentes.

#### 4.3.1. Elementos de la Transmisión

Ya se comentaron los componentes básicos (en bloques) de un sistema de transmisión en cadena de información por fibras ópticas; en la figura 4.3.3. se detallan lo que con tienen los bloques, en lo que a componentes se refiere.

Las secciones del sistema son: un transmisor consis-- tente en una fuente de luz ó emisora con su respectivo cir cuito de alimentación; un cable que ofrece protección mecá nica y ambiental a las fibras ópticas contenidas dentro; un receptor que se forma de un fotodetector, un amplifica dor y un circuito restaurador de señales.

El cable de fibra óptica puede contener adicionalmente alambres de cobre para usarse como repetidores de poten cia, los cuales son necesarios para las amplificaciones y restauraciones periódicas de las señales, sobre todo cuando se tienen grandes distancias de transmisión.

La fuente óptica es dimensionalmente compatible con el núcleo de la fibra y se encarga de "lanzar la potencia óptica en la fibra". LED'S ó diodos láser son buenos emi sores ya que la luz de salida se puede modular rápidamente variando la corriente de polarización.

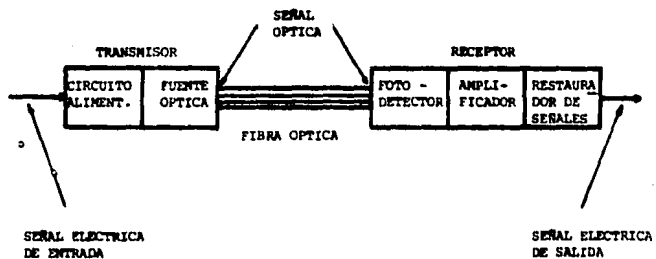


FIGURA 4.3.3.

Elementos básicos de la transmisión en cadena por fibras ópticas.



Las señales eléctricas que entran al transmisor pueden ser en forma digital ó analógica. El circuito transmisor convierte tales señales eléctricas en ópticas, variando la corriente que fluye a través de la fuente de luz.

En las fuentes ópticas, una variación lineal en la corriente de alimentación, causa un cambio lineal correspondiente a la potencia óptica de salida.

Después que la señal óptica se "lanza" en la fibra, ésta se atenúa y distorsiona progresivamente con la distancia por los mecanismos ya mencionados de absorción y esparramiento.

En el receptor, la señal modulada óptica con atenucción y distorsión sale de la fibra y es detectada por un fotodiodo. El fotodetector es un dispositivo con ley cuadrática (como la fuente óptica) que convierte la señal ó potencia óptica recibida directamente en una corriente eléctrica de salida (fotocorriente). Los semiconductores PIN y los fotodiodos de avalancha (APD'S) son los dos tipos de fotodetectores usados por su alta eficiencia y velocidad de respuesta.

El receptor es más complejo en su diseño que el transmisor, debido a que tiene que amplificar y reformar la se-

ñal degradada recibida por el fotodetector; se caracteriza por la mínima potencia óptica necesaria para obtener la capacidad de datos deseada, obteniendo bajas probabilidades de error para sistemas digitales ó una determinada relación señal a ruido para sistemas analógicos.

Debido a la distorsión y atenuación de las señales a lo largo de la fibra, se necesitan repetidores en la línea de transmisión para amplificar y reformar la señal. La sección receptora detecta la señal óptica, la convierte en una señal eléctrica, la amplifica, la reforma y la envía como señal eléctrica a la entrada del transmisor; - así mismo, el transmisor convierte la señal eléctrica a - óptica y la envía de vuelta a la fibra.

#### 4.3.2. Arreglos Típicos de los Sistemas

Existen básicamente 3 arreglos de sistemas de transmisión de información; simple (simplex), doble (duplex) - y múltiple (multiplex).

La transmisión simple (simplex) describe transmisión en una dirección solamente, de un transmisor simple a uno ó más receptores.

En la transmisión doble (duplex) existen 2 estaciones, cada una de las cuales puede transmitir o recibir señales. La transmisión simultánea de datos en ambas direcciones se llama "duplex total" (full duplex); la transmisión alternada en una y otra dirección se llama "medio duplex" (half duplex).

La transmisión múltiple (multiplex) es similar a la "half duplex" con un medio de transmisión compartido, --- excepto que más de dos estaciones están involucradas. -- Cuando se multiplexean datos, las estaciones son colocadas a lo largo del medio de transmisión.

El arreglo múltiple en estrella, existen medios separados de transmisión de una estación maestra a otras estaciones esclavas. En la figura 4.3.4. se muestran los --- arreglos anteriores.

#### 4.4 SISTEMAS DE FIBRAS OPTICAS.

En las primeras aplicaciones de fibras ópticas en la transmisión en cadena de información, se trabajaba con velocidades de transmisión de 2 a 50 Mb/seg, que es pequeño con lo actual que llega a más de 600 Mb/seg..

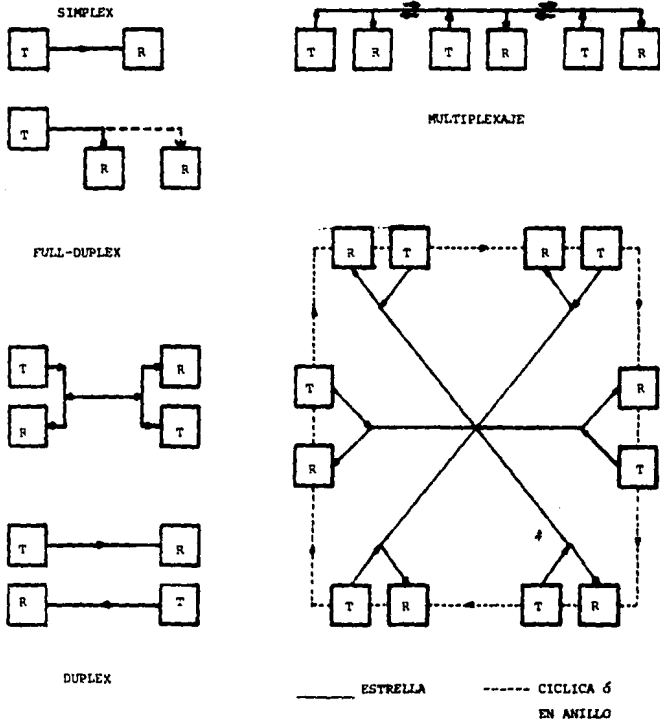


FIGURA 4.3.4.

Arreglos típicos de sistemas de comunicación.

Los equipos electrónicos y ópticos usados en tales sistemas operan en el rango de longitudes de onda de 810 a 890 nm, donde las pérdidas nominales de transmisión son de 4 dB/km cuando mucho después de instalación y acoplamiento. Lo actual lleva a los sistemas a operar en la región de 1.3 micrómetros, donde las pérdidas en transmisión no son mayores a 1 dB/km, incrementando la distancia entre repetidores.

Sistemas aplicables en plantas de energía, químicas o para sistemas de suscripción como Cablevisión, ya se mencionaron en el Capítulo 1.

La gran ventaja de los modernos sistemas ópticos, es su capacidad de crecimiento y de reparación, gracias a los módulos intercambiables que por los pocos componentes y la gran demanda que tienen, están tendiendo a bajar su costo.

No hay que olvidar que el mejor sistema no es exclusivamente formado con fibras ópticas y equipos optoelectrónicos, sino en combinación con los equipos tradicionales; así mismo si es bueno hacer notar que en un futuro cercano sí serán exclusivamente fibras ópticas, equipos optoelectrónicos, etc., por todas las ventajas ya nombradas.

Cabe notar que al hablar de "sistemas" se incluye todo lo que lo hace funcionar lo más óptimamente posible: LED'S, fotodetectores, fibras ópticas, interfases, decodificadores, sistemas de alarma, fuentes de poder, etc..

En lo que se refiere a los arreglos de sistemas se entenderá que tomar en cuenta para que va a ser usado, necesidades futuras de ampliación; así como el costo más bajo posible, pero siempre dentro de lo óptimo.

#### 4.5 CONCLUSIONES.

Todo lo básico que nos hace introducirnos en los sistemas de comunicación fué tratado en éste capítulo. Resulta interesante el observar la figura 4.2.2. en que se ven todos los medios y formas usados en los sistemas de comunicación.

Los módulos básicos se describieron globalmente, pero más adelante se tratarán los componentes con mayor detalle. Dichos diagramas de bloques nos muestran la semejanza de todos los sistemas y prácticamente no se diferencian a los sistemas ópticos, pero es análogo a tener un diagrama de flujo para un programa de computadora, se pueden usar diferentes lenguajes, pero existen algunos que resultan más -- convenientes y prácticos que otros, lo cual resulta igual en los sistemas ópticos.

## V. ANALISIS DE LA TRANSMISION EN CADENA DE INFORMACION.

### 5.1 ANTECEDENTES.

Quando se diseñan sistemas de fibras ópticas, se debe dar bastante importancia al costo del cable de fibra óptica. El diseño a bajo costo puede requerir escoger un cable barato, más no es necesario aunque sea de mayor costo.

Una fuente emisora es escogida con una longitud de onda correspondiente a la longitud de onda a la cual el cable de fibra óptica tiene una atenuación mínima y el área de emisión debe ser semejante al área de la fibra para facilitar y maximizar el flujo emitido.

El detector debe operar a la longitud de onda del emisor y el área de detección debe ser igual ó mayor que la del cable de fibra óptica para minimizar las tolerancias de acoplamiento.

Cabe recordar que en el capítulo II se trató todo lo referente a los fundamentos de operación de las fibras ópticas, sobre todo lo referente a flujo, pues es importante para este capítulo.

La transmisión en cadena de información da lugar a variedad de clasificaciones en los sistemas de fibras, desde la analógica hasta la digital. La transmisión analógica y ó digital puede ser dividida, dependiendo del rango en sistemas de rango corto y rango largo.

Los sistemas de rango corto son los de menos de 1 km. de longitud y son usados para interconectar 2 piezas ó componentes de un equipo.

Los sistemas de rango largo que son los de nuestro mayor interés son aquellos de más de 1 kilómetro de longitud y son usados para conexiones entre ciudades, plantas industriales ó centrales eléctricas.



Como se comentó anteriormente, la longitud del sistema y modo de transmisión (sistema de pulsos codificados - PCM, por ejemplo; determinan la calidad de la fibra (en términos de la atenuación y ancho de banda), así como tipo de fuente y fotodetector óptico.

Tomando lo anterior como punto de partida, se procederá a analizar los aspectos fundamentales que afectan la transmisión en cadena de información.

## 5.2 FUENTES Y DETECTORES OPTICOS.

La propagación en el cable de fibra óptica es en forma de luz ó más específicamente como radiaciones electromagnéticas en el rango espectral cercano a la luz visible ó infrarroja. Debido a que los niveles de señales a ser generados son normalmente eléctricos en naturaleza (como señales lógicas digitales a los niveles  $T^2L$ ), es necesario convertir la señal de la fuente a luz en el fin del transmisor y de luz a señales  $T^2L$  otra vez en el receptor. Los elementos que hacen posible lo anterior son las fuentes y detectores ópticos; los díodos láser, los díodos emisoros de luz (LED'S), los fotodetectores y los conectores son componentes cruciales en los sistemas de fibras ópticas.

Así mismo, es importante tener un conocimiento y control de tales dispositivos para conocer las limitantes --- cuando se designan sistemas. Cada aplicación requiere necesidades especiales de componentes.

### 5.2.1. Dispositivos Optoelectrónicos

Los convertidores optoelectrónicos (O/E) y electro-  
ópticos (E/O) son como habíamos comentado, elementos vitales en un sistema de comunicación óptica. Los diodos láser y los LED'S son escogidos como emisores de luz, debido a su pequeño tamaño, alta eficiencia y alta velocidad de modulación, aunados a su bajo costo.

A manera análoga, los fotodiodos semiconductores (PIN) y los fotodiodos de avalancha (APD) de silicio ó germanio, son usados como detectores ópticos para diferentes longitudes de onda de transmisión.

A continuación daremos una introducción a los dispositivos descritos anteriormente, pues un mayor análisis nos haría salirnos de nuestro principal objetivo.

### 5.2.2. Fuentes Ópticas

Las dos principales fuentes ópticas que se nombrarán son: los diodos láser y los LED'S. Su construcción es básicamente de dos diferentes aleaciones, siendo la principal el arsénico de Galio, el cual comprende un rango de trabajo en la región de longitud de onda de 810-890 nm.

Una diferencia notable entre los diodos láser y los LED'S, es que los primeros tienen una respuesta esponencial en lo referente a la potencia de la luz emitida para una determinada corriente de entrada, mientras que, los LED'S son lineales, aunque para una misma corriente los láser dan más potencia en la luz emitida.

Es importante recordar que en el capítulo III (figura 3.2.1.) se comentó la aplicación de los tipos de fuentes ópticas a los diferentes tipos de fibras, considerando su costo.

Los diodos láser y los LED'S están formados por uniones pn de materiales semiconductores. Cuando esta unión se polariza en directo, los electrones y huecos son inyectados en las regiones p y n respectivamente; esta inyección de portadores minoritarios provoca la recombinación, lo cual causa la emisión de un fotón de energía  $h\nu$  en su -

defecto, cuando no hay recombinación existe disipación en forma de calor. A la union pn se le conoce como región - activa ó de recombinación.

La mayor diferencia entre los LED'S y los diodos láser (LD) es que la salida óptica (como ya comentamos antes) de un LED, es incoherente, mientras que la de un láser es coherente. El concepto anterior se aclara con la siguiente definición:

- Rayos luminosos coherentes: son aquellos rayos que proceden del mismo punto de un manantial luminoso y teniendo una muy pequeña divergencia.

Debido a la coherencia, los diodos láser pueden usarse en fibras mono y multimodo, mientras que los LED'S por su gran incoherencia sólo pueden acoplarse en fibras multimodo.

Lo descrito hasta ahora puede observarse en la figura 5.2.2., en el que se observa la manera en que los LED'S y los diodos láser emiten la luz, así como una curva de corriente versus luz de salida.

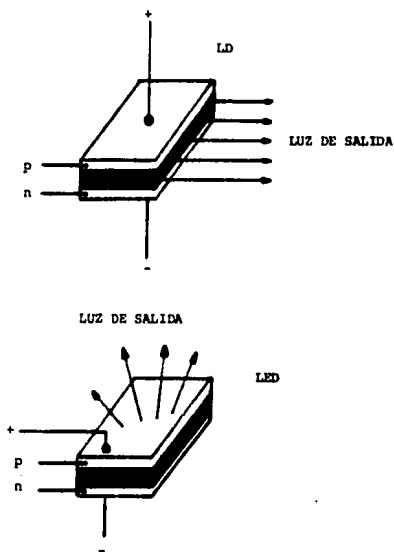
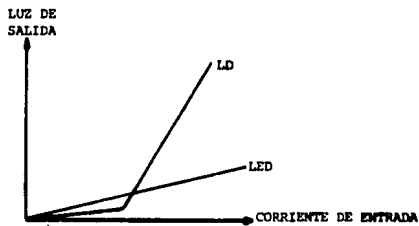


FIGURA 5.2.2.

Características de los LED'S y diodos láser.

Para concluir, se citan las ventajas de los diodos - láser sobre los LED'S:

1.- Rápido tiempo de respuesta, lo que hace posible transmitir un mayor número de bits/segundo.

2.- Un ancho de banda estrecho de la salida, lo cual implica menor dispersión que evita inducirse en la señal, causando distorsión.

3.- Se puede acoplar con fibras una mayor potencia - óptica, lo cual permite mayores distancias de transmisión sin necesitar repetidores.

Así mismo, los inconvenientes de los diodos láser -- son:

1.- Su construcción es más complicada, debido al requerimiento de confinar toda la corriente en un hueco pequeño que es por donde fluye la luz emitida por el láser.

2.- El nivel de la potencia de salida es fuertemente dependiente de la temperatura, lo cual aumenta la complejidad del circuito transmisor. Si un diodo láser es usado sobre un ancho rango de temperatura, entonces se necesitará un mecanismo de enfriamiento para mantener al lá--

ser a una temperatura constante, ó bien, el uso de un sen  
sor de corriente máxima que ajuste la corriente de polari  
zación con cambios en la temperatura.

3.- Son muy prestos a degradarse, lo cual reduce el tiempo de vida del dispositivo. Este es un daño mecánico de las caras que puede aumentarse después de que el láser opera pequeños tiempos a altas potencias ópticas.

### 5.2.3. Detectores Ópticos

Al final de la línea óptica de transmisión, debe exis  
tir un dispositivo receptor que interprete la información contenida en la señal óptica. El elemento que se encarga de tal conversión es el fotodetector, el cual debe ser insensible a las variaciones de temperatura, ser compatible en dimensiones al cable de fibra óptica y un costo razonable en relación a los otros componentes del sistema.

De los fotodetectores semiconductores, el fotodiodo - es usado casi siempre exclusivamente para los sistemas de fibras ópticas por su pequeño tamaño, material apropiado, alta sensibilidad y un rápido tiempo de respuesta. Los -- dos tipos de detectores usados son: el fotodiodo semicon-- ductor "pin" y el fotodiodo de avalancha ó APD.

Primero se hablará del fotodiodo semiconductor pin, del cual se muestra un esquema en la figura 5.2.3.1. La estructura del dispositivo consiste de dos regiones: p y n, las cuales están separadas por un material n intrínseco ligeramente contaminado (región i). En operación normal un suficiente voltaje de polarización inverso es aplicado a través del dispositivo con el objeto de que la región intrínseca (i) éste llena de portadores; esto es, -- que la concentración de portadores n y p son insignificantes comparados con la concentración de impurezas en la región "i".

Cuando un fotón incidente tiene una energía mayor ó igual al valor de la banda de energía del material semiconductor (energy gap), el fotón puede dar su energía y excitar un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. Este proceso genera pares libres -- electrón-hueco llamados fotoportadores. Lo anterior ocasiona un flujo de corriente en el circuito externo con un flujo de un electrón para cada par de portadores generado; ésta corriente tiene el nombre de fotocorriente. Este -- proceso también se observa en la figura 5.2.3.1.

Ahora se hablará de los fotodiodos de avalancha --- (APDs), los cuales multiplican internamente la señal primaria (fotocorriente) antes que entre a la etapa amplificadora.



## VOLTAJE INVERSO DE POLARIZACION

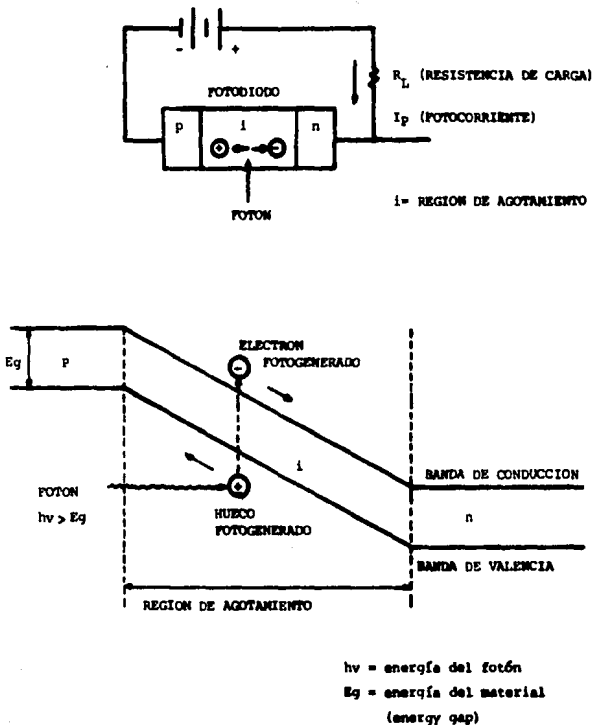


FIGURA 5.2.3.1.

Representación del fotiodo pin y del proceso de detección.

Esto incrementa la sensibilidad del receptor, debido a que la fotocorriente es multiplicada antes de encontrarse con el ruido térmico asociado al receptor. Para que la multiplicación de portadores se lleve a cabo, los portadores fotogenerados, deben atravesar una región con un alto campo eléctrico. En ésta región de alto campo eléctrico un hueco ó electrón fotogenerado pueden ganar la suficiente energía para ionizar los electrones que saltan de la banda de valencia, chocando con ellos.

La multiplicación de portadores se conoce como ionización por impacto. Los portadores creados también son acelerados por el campo eléctrico ganando energía para causar mayor ionización por impacto. Este fenómeno se conoce por efecto avalancha. Concluimos que la ganancia del dispositivo es inherente a la aplicación del voltaje de polarización.

### 5.3 ENCADENAMIENTOS PUNTO A PUNTO.

Anteriormente pudimos observar que el sistema más sencillo de transmisión consta de transmisión, línea y receptor; a partir de éste simple sistema surgen otros sistemas más complejos como el duplex, estrella, etc..

Para el diseño de un encadenamiento óptico se tienen que considerar diversas variables entre la fibra, fuente y detector óptico, requiriéndose un análisis profundo para la selección óptima de éstos; así mismo, se tiene que cuidar escoger los componentes adecuados y que trabajen en su rango recomendando con el objeto de no reducirles su tiempo de vida y causar problemas al resto del sistema.

Existen 3 aspectos fundamentales que se necesitan -- analizar para el diseño de un encadenamiento punto a punto:

- 1.- La distancia deseada (ó posible) de transmisión.
- 2.- La velocidad de transmisión ó ancho de banda del canal.
- 3.- El porcentaje de errores de información (BER-bit error, rate).

Para el cumplimiento de los requerimientos anteriores, se tiene que escoger los siguientes componentes, así como sus características típicas de operación y compatibilidad:

- 1.- Fibra óptica de tipo monomodo ó multimodo.
  - a) diámetro del núcleo
  - b) ancho de banda
  - c) atenuación
  - d) apertura numérica
  - e) índice de refracción del núcleo
  
- 2.- Fuente óptica a base de LED ó láser.
  - a) longitud de onda de emisión
  - b) potencia de salida
  - c) área efectiva de radiación
  - d) configuración de emisión
  
- 3.- Detector óptico a base de pin ó APD.
  - a) responsividad
  - b) longitud de onda de operación
  - c) velocidad de respuesta
  - d) sensibilidad
  - e) corriente de oscuridad

Aquí se necesitan analizar dos conceptos básicos; el presupuesto de flujo y el tiempo de subida de los cuales se habló ampliamente en el capítulo II, el cual es el punto de partida para un análisis profundo.

Si al elegir los componentes del sistema, éstos no permiten la distancia deseada de transmisión, los componentes deben cambiarse ó colocar repetidores a lo largo de la línea, según resulte el aspecto económico.

Algunas características de los componentes ya fueron tratadas anteriormente para aquellas que no se habían comentado, se da una breve definición a continuación:

a) Responsividad:

Usualmente se da en amperes/watt a una determinada longitud de onda. Es una medida de la corriente de salida del diodo para una potencia óptica lanzada a la fibra.

b) Velocidad de respuesta:

Determina la capacidad máxima de transmisión de información del diodo y en conjunción con la respuesta de otros elementos del sistema, fijan la máxima velocidad de transmisión.

c) Corriente de oscuridad:

Es la corriente inversa de fuga generada térmicamente. En conjunción con la corriente calculada para la potencia incidente y responsividad, dan la relación esperada en el sistema de encendido-apagado.

Todos los aspectos mencionados aquí junto con los -- descritos en el capítulo II dan las bases para el diseño completo de un sistema de transmisión en cadena por fi--- bras ópticas.

El concepto de BER (bit error rate) será tratado más adelante en éste capítulo pues es un aspecto importante - para el análisis del diseño de sistemas ópticos y para la selección adecuada del código de transmisión.

### 5.3.1. Secuencia de Diseño

Como una breve conclusión a lo que es el diseño de - encadenamientos punto a punto (POINT TO POINT LINKS), se citan los pasos que se pueden seguir para diseñar un sistema completo en forma correcta:

#### 1.- Descripción del transmisor.

- a) diagrama de bloques y descripción funcional
- b) diagrama esquemático y consideraciones de di-  
seño
- c) funcionamiento del transmisor

- 2.- Descripción del receptor.
  - a) diagrama de bloques y consideraciones de diseño
  - b) relación s/n requerida y amplitud de detección
  - c) diagrama esquemático e implementación del circuito
  - d) funcionamiento del receptor
  
- 3.- Construcción de los circuitos impresos.
  - a) lista de partes y componentes
  - b) armado del circuito
  - c) requerimientos de protección
  
- 4.- Pruebas de los circuitos.
  - a) prueba del equipo requerido
  - b) prueba del transmisor - receptor
  - c) análisis de las formas de onda
  
- 5.- Comportamiento del sistema.
  - a) interpretación de las especificaciones de la fibra, emisor y detector
  - b) cálculo de las pérdidas y velocidad de transmisión
  - c) pruebas finales
  - d) armado final del circuito

Las consideraciones anteriores pueden tener modificaciones según se adapten a las necesidades de cada diseñador.

#### 5.4 CLASIFICACION DE LAS SEÑALES.

Una señal es un fenómeno eléctrico cuya variación depende del tiempo, tal es el caso del voltaje, corriente, resistencia, campo eléctrico.

Una característica importante de las señales es que tienen que ser funciones de tiempo univaluadas; lo anterior quiere decir que en cada instante de tiempo la señal sólo puede tener un valor. Es importante este concepto -- pues no todas las funciones del tiempo son señales, ya que son multivaluadas, o sea, que en cada tiempo la señal puede tener 2 ó más valores. Una analogía para entender el concepto de señal es del generador de funciones, el cual -- no puede producir 2 ó más valores en el mismo tiempo.

De acuerdo a sus características, las señales se pueden dividir en:

I.- ALTERNAS.- Cuando el área arriba del eje del tiempo es igual al área de abajo del eje del tiempo.



1.1 DETERMINISTICAS: Son aquellas señales que tienen una ecuación conocida.

1.1.1. PERIODICAS.- se repiten cada determinado tiempo, como la función senoidal.

1.1.2. APERIODICAS.- no siguen una repetición cada cierto tiempo, son heterogéneas.

1.1.1.1. SENOIDALES.- son las que tienen forma senoidal.

1.1.1.2. NO SENOIDALES.- son las que tienen una forma diferente a la senoidal.

1.2 ALEATORIAS: Son aquellas que no conocemos su ecuación, como la voz humana.

1.2.1. CONTINUAS.- son aquellas que nunca se cortan ó presentan discontinuidades.

1.2.2. DISCONTINUAS.- son las que se cortan al pasar por el eje del tiempo ó tienen discontinuidades.

II.- DIRECTAS.- Cuando se encuentran de un solo lado del eje del tiempo.

2.1 DETERMINISTICAS: Son aquellas señales que tienen una ecuación conocida.

2.1.1. PERIODICAS.- se repiten cada determinado tiempo constante.

2.1.2. APERIODICAS.- no siguen una repetición cada cierto tiempo.

2.1.1.1. CONTINUAS.- son las que no se cortan.

2.1.1.2. DISCONTINUAS.- son las que presentan discontinuidades.

2.2 ALEATORIAS: Son aquellas que no conocemos su ecuación.

2.2.1. CONTINUAS.- son aquellas que nunca se cortan ó presentan discontinuidades.

2.2.2. DISCONTINUAS.- son las que se cortan al pasar por el eje del tiempo ó tienen discontinuidades.

La clasificación anterior nos sirve para un mejor entendimiento de lo que es los códigos de transmisión de información.

## 5.5 PROBABILIDAD DE ERROR EN LA TRANSMISION.

En los receptores digitales la señal amplificada y filtrada es comparada con el nivel llamado umbral, una vez en cada tiempo, esto es con el objeto de determinar cuando un pulso está presente en el fotodetector en el tiempo evaluado. Idealmente el voltaje de salida  $V_o(t)$  representa un uno (1) lógico, cuando supera el valor establecido para el umbral mientras que será un cero (0) lógico cuando tal voltaje sea menor al del umbral. Sin embargo, existen ocasiones en que una señal externa llamada ruido contamina a la señal por interpretar; lo anterior sucede cuando el ruido sobrepasa el umbral causando errores, ya que no se distinguen los 1 y 0's lógicos.

Cuando no se especifica el umbral se fija a la mitad de la altura del pulso, pudiéndose cambiar éste valor.

Se han desarrollado diversas formas de medir el porcentaje de errores ocurridos en una transmisión digital de datos. Una buena aproximación es el dividir el número de errores  $N_e$  ocurridos en un cierto intervalo de tiempo

"t" por el número de pulsos (unos y ceros)  $N_t$  transmitidos durante ese intervalo. Esta relación es llamada porcentaje de errores de transmisión ó porcentaje de errores, siendo su nombre común BET (bit error rate), de aquí tenemos que:

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{Bt}$$

donde:  $B = 1/T_b$  es el porcentaje de bits ó información, o sea el porcentaje de transmisión de pulsos.

Un bit es la mínima cantidad de información, más explícitamente representa un 1 ó un 0 (cero).

El término BER se expresa por números como  $10^{-6}$ , el cual representa la ocurrencia de un error por cada millón de pulsos enviados. Los BER más frecuentes en las transmisiones ópticas van de  $10^{-6}$  a  $10^{-10}$ , siendo el más típico  $10^{-9}$ . El BER en un sistema depende de la relación señal a ruido del receptor, o sea el cociente de la potencia de la señal a la potencia del ruido, lo que indica que entre mayor sea este valor el ruido es más pequeño reduciendo la probabilidad de error.

Para calcular el BER en el receptor es necesario conocer la distribución de probabilidad de la señal de salida, lo cual es importante porque es donde se hace la decisión de si es uno ó cero, el pulso enviado. En la figura 5.5 se observan los conceptos de umbral y las distribuciones de probabilidad para señales de 1's y 0's.

De la distribución de Gauss obtenemos las formas de las probabilidades de la figura 5.5.:

$$P_1 (v) = \int_{-\infty}^v P (Y/1) dy \quad (1)$$

que representa la probabilidad que el voltaje de salida sea menor a  $v$  cuando un pulso positivo (1 lógico) es enviado, y

$$P_0 (v) = \int_v^{\infty} P (Y/0) dy \quad (2)$$

que representa la probabilidad que el voltaje de salida exceda a  $v$  cuando un 0 fué transmitido.

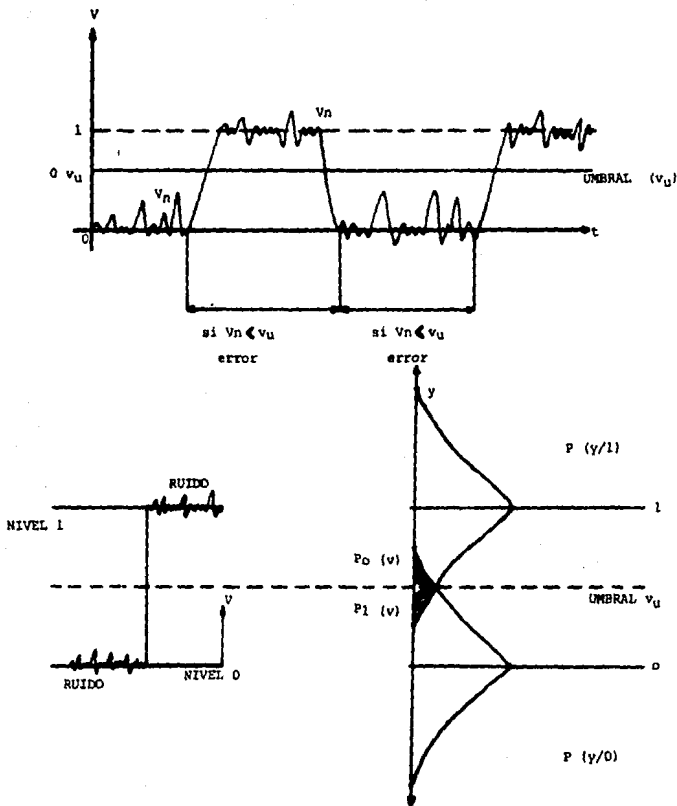


FIGURA 5.5

Concepto de umbral y distribuciones de probabilidad para señales de 1 y 0.

Como observamos  $v$  es el valor del umbral, y puede ser a la mitad del pulso ó en otro lado.

Las funciones  $p$  (Y/o) representan las probabilidades condicionales que ocurran tales eventos.

Si el voltaje del umbral se fija a  $v_u$ , la probabilidad de error  $P_e$  total se expresa por:

$$P_e = a P_1 (V_u) + b P_0 (V_u) \quad (3)$$

donde  $a$  y  $b$  se determinan a priori de la distribución de datos y representan la probabilidad que un uno ó cero ocurra respectivamente. Para el caso en que tengan igual probabilidad de ocurrir  $a = b = 0.5$ . Aquí sólo faltaría seleccionar el valor del umbral donde  $P_e$  sea mínimo.

Como se observa en la última expresión el concepto de voltaje de umbral es importante, pero también el ruido es un aspecto determinante para calcular la probabilidad de error; para tal efecto se usan unas tablas de probabilidad en función del voltaje RMS del ruido. Para entender éste concepto resolveremos un problema típico que se presenta en las comunicaciones.

El objeto es encontrar la probabilidad de error al transmitir una señal binaria en que la probabilidad de mandar un uno es 70% y de un cero 30%. La señal binaria llega al detector contaminado con una señal de ruido de 0.1 Volts RMS. La señal es de 1 Volt pico.

Para resolver éste problema nos ayudaremos de las tablas de probabilidad en función del ruido, las cuales implican la probabilidad de equivocarme en un uno ó cero -- (ecuaciones 1 y 2).

Los valores de  $a = 0.7$  y  $b = 0.3$  fueron fijados a priori por la distribución de la señal.

Como no especifican umbral, lo fijamos a la mitad del valor de la señal, esto es a 0.5V.

Sacamos una relación de cuantas veces cabe el voltaje del ruido en el valor  $\sigma$  en el valor del voltaje del umbral:

$$\frac{0.5 \text{ V}}{0.1 \text{ V}} = 5 \sigma$$



Con éste valor en las tablas encontramos  $P_1 (Vu)$  y  $P_0 (Vu)$ , con el siguiente valor:

$$P_1 (Vu) = P (Vn < -0.5V) = P (Vn < -5\sigma)$$

$$P_0 (Vu) = P (Vn > 0.5V) = P (Vn > 5\sigma)$$

$$P_1 (Vu) = P_0 (Vu) = 2.87 \times 10^{-7}$$

$$P_e = a P_1 (Vu) + b P_0 (Vu)$$

$$P_e = 0.7 (2.87 \times 10^{-7}) + 0.3 (2.87 \times 10^{-7})$$

$$P_e = (0.7 + 0.3) (2.87 \times 10^{-7})$$

$$P_e = 2.87 \times 10^{-7}$$

Lo anterior quiere decir que por cada  $1 \times 10^9$  bits -- que mandemos, solamente 287 estarán equivocados. La reducción sería posible cambiando el valor del umbral para hacer mínimo el valor de  $P_e$  y mayor la eficiencia del sistema.

El término  $Vn$  es el voltaje RMS de la señal de ruido.

El concepto de BER es trascendental para el óptimo funcionamiento de un sistema de transmisión óptico, pues ayuda a optimizar el diseño en lo referente a errores por transmisión que en ocasiones son bastante costosos.

## 5.6 CODIGOS DE TRANSMISION.

Para la transmisión en cadena de información es de vital importancia el formato ó código de transmisión de la señal óptica. El circuito detector debe ser capaz de extraer en el tiempo preciso la información contenida en la señal óptica.

Para que la señal sea decodificada correctamente es necesario que se cumplan tres requisitos:

- Efectuar el muestreo de la señal por el receptor en el momento en que la relación señal a ruido sea máxima.
- Mantener el espacio entre pulsos para evitar mezclas que distorsionen la señal original.
- Indicar el principio y fin de cada intervalo de tiempo.

Es muy factible que en el proceso de detección de la señal se produzcan errores por ruidos en la línea de --- transmisión y mecanismos de distorsión, por tanto son necesarios los detectores de errores, ya sea por retrotransmisión, repetición de la información ó por contexto, lo - cual se logra transmitiendo bits de más que posteriormente son retirados en el receptor.

La codificación de señales se basa en una serie de - reglas para acomodar los símbolos que contienen la información en un formato determinado; éste proceso es el conocido por códigos de línea ó formatos de transmisión.

Algo que no se había comentado a detalle es el de -- aclarar que se tratan los códigos binarios por su fácil - uso como señales eléctricas y ventajas en la transmisión por fibras ópticas.

Una de las funciones principales de los códigos de - línea es el de transmitir bits extras, ésto es: redundancia, la cual minimiza los errores resultantes de interferencias y de los factores descritos anteriormente, pudiéndose lograr con determinada redundancia una transmisión - libre de errores.

El trabajar con códigos binarios con 2 niveles aumenta en gran medida la capacidad de las fibras ópticas para transmitir información en forma eficiente y económica.

Los códigos más usados son:

- NRZ (non return to zero ó no regreso a cero)
- RZ (return to zero ó regreso a cero)

#### 5.6.1. Código NRZ

El significado de NRZ es el de no regreso a cero, o sea, que la señal no regresa periódicamente a cero; para una señal con varios 1's, la señal permanecerá en el nivel 1 hasta que encuentre un 0, caso en el que bajará a dicho nivel hasta que vuelva a encontrar otro 1. Este código es simple de generar y decodificar, pero no posee capacidades de corrección de errores y requiere de una señal de reloj.

Aparte de todo los pulsos largos de 1's ó 0's contienen información de tiempos, debido a que no hay transiciones. Esto puede causar que una larga serie de N bits --- idénticos pueden ser mal interpretados como N+1 ó N-1 bits,

lo cual hace cambiar totalmente la información original y se cede debido a que en el último pulso N, no sabe el receptor si es transición positiva ó negativa.

### 5.6.2. Código RZ

Las palabras RZ son lo mismo que regreso a cero y se explica así: la primera mitad de una transición hace permanecer a la señal en estado alto, si se trata de un 1 y en estado bajo para un 0, la segunda mitad siempre estará en estado bajo.

Cabe aclarar que el término alto es igual a 1, encendido, ON; mientras que bajo se refiere a 0, apagado, OFF; siempre que se trabaje con lógica positiva.

La ventaja del código RZ es el no tener que usar una señal de reloj, pero tiene la desventaja que las series largas de bits en estado bajo (ó lógico) pueden causar perder la sincronía, en el tiempo; también tiene el inconveniente de tener que usar 2 símbolos para codificar cada bit de información.

Un código que evita perder la sincronización del tiempo es el Bifásico ó Manchester. Aquí una transición negativa indica un bit positivo ( lógico ). Este código es -

fácil de generar y decodificar y tampoco requiere de un reloj para establecer su tiempo.

Existen otros códigos de transmisión usados en alambres ó cables coaxiales, pero los nombrados anteriormente son los que mejor se adoptan a la optoelectrónica.

En la figura 5.6 se muestran los códigos mencionados anteriormente codificados para una señal binaria con la respectiva señal de reloj; en tales diagramas es fácil -- distinguir las diferencias entre códigos.

## 5.7 CONCLUSIONES.

El aspecto fundamental para transmitir información -- de un lado a otro por medio de dispositivos optoelectrónicos fué tratado en éste capítulo.

Los dispositivos optoelectrónicos aquí tratados dan una base para poder seleccionar el que más se adapte a -- las necesidades del sistema por diseñar, además se tienen que considerar aspectos como costo y horas de vida.

Algunas reglas de análisis para optimizar el diseño de encadenamientos punto a punto, tanto en funcionamiento

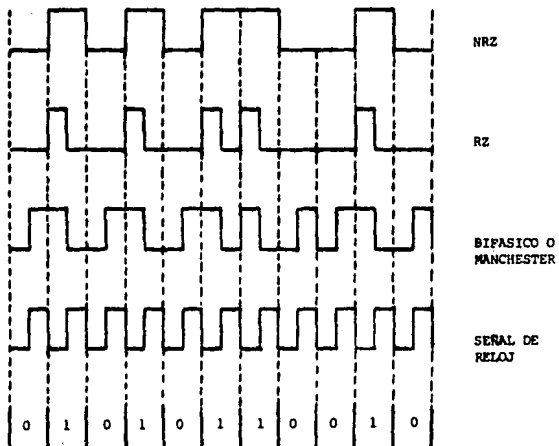


FIGURA 5.6

Representación de los códigos de transmisión.

como en economía fueron descritas, tratando de ser lo más explicitos posible.

El concepto de error, quizá tan insignificante, pero tan trascendente nos da una idea de como un determinado mensaje puede modificarse causando bastantes problemas en diversos aspectos, de aquí se ve la importancia de tratar de comprobar la eficiencia del sistema escogiendo los elementos óptimos, así como el código de transmisión que mejor se adapte al sistema.



## VI. ASPECTOS GENERALES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION.

### 6.1 INTRODUCCION.

Un aspecto de vital importancia para el desarrollo de un gran número de campos en la industria, ha sido el de poder controlar la energía y aquí no debe pensarse solamente en eléctrica, sino también en sus otras formas de las que se hablará posteriormente.

En el presente capítulo se da un aspecto de las líneas de transmisión como base para el entendimiento de la instalación de cables de fibras ópticas en los hilos de guarda.

En lo referente al uso de la energía, año con año se están buscando nuevas fuentes productoras. va que la excesiva población y el consumo desmedido están acabando con las formas conocidas de producción de energía.

Fuentes de energía como la radiante, la térmica, la química, nuclear, etc., pronto se agotarán ó su producción no será suficiente para la futura demanda, de ahí que los estudios en dichas ramas sean vitales para garantizar la subsistencia futura de energéticos.

## 6.2 SISTEMAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION.

La composición típica de un sistema eléctrico puede ser homóloga al de transmisión de información por un cable óptico. Los principales elementos de un sistema de energía eléctrica son:

### 6.2.1. Plantas Generadoras

Como su nombre lo indica se encargan de producir la energía eléctrica por cualquiera de las formas descritas en el punto anterior; se encuentran alejadas de los centros de consumo.

### 6.2.2. Subestaciones Elevadoras

Se encargan de elevar la tensión a la salida de los generadores y realizar una transmisión más económica, debido al producto voltaje por corriente igual a potencia, reduciendo las pérdidas a manera como se comentó anteriormente. Esta operación la efectúan los transformadores.

### 6.2.3. Línea de Transmisión

Es el medio por el cual se transmite la energía eléctrica; la línea se forma de un cable de cobre ó aluminio reforzado con acero soportados por una estructura llamada torre de transmisión. Las líneas de transmisión tienen - unos cables extras de acero ó acero con aluminio llamados hilos de guarda, los cuales sirven para proteger a la línea de descargas atmosféricas y como sistema de tierra.

### 6.2.4. Subestaciones Reductoras

Son aquellas que reducen la tensión de la línea a un voltaje menor y más seguro, para alimentar a los centros de distribución que se encuentran ya en las mismas ciudades.

### 6.2.5. Sistemas de Distribución

Se ocupan para dar el voltaje que se emplea en los hogares ó fábricas; se utiliza un transformador colocado normalmente en los postes de luz para reducir el voltaje a 127 ó 220 Volts; en fábricas puede ser un mayor voltaje.

### 6.2.6. Cargas

Son aquellos aparatos eléctricos que necesitan energía eléctrica para funcionar, pueden ser domésticos (TV, planchas, lavadoras) ó industriales (motores, bombas).

El conjunto de lo que forma el sistema de distribución puede tomar diferentes disposiciones, ya sea que se haga con líneas aéreas ó subterráneas ó con arreglos radiales en anillo ó red como los de fibras ópticas que se describieron anteriormente.

## 6.3 CARACTERISTICAS ELECTRICAS GENERALES.

La composición de una línea de transmisión fué explicada en el punto anterior, ahora se darán algunos conceptos importantes relativos a las características eléctricas de los conductores.

Según sean las dimensiones y el material de los conductores, éstos tendrán una determinada resistencia, una inductancia que depende de los campos magnéticos entre los conductores, así como la capacitancia que tienen los conductores entre sí ó con la tierra usando al aire como dieléctrico.

Los materiales más usados como conductores son el cobre y el aluminio, mientras que el acero se usa como hilo de guarda en las líneas de transmisión.

El aluminio es usado como conductor aéreo por su bajo peso y buena conductividad, reforzándose con un alma de acero cuando la distancia entre postes es grande, lo anterior se debe a la baja carga de ruptura que soporta el aluminio. El hecho de no usar cobre para líneas aéreas es por su mayor peso (casi 3 veces más), lo cual aumentaría el costo de las torres de transmisión.

Normalmente se emplean conductores formados por varios alambres en forma trenzada (cableado), lo anterior es con el objeto de evitar vibraciones que puedan romper los soportes, dar una determinada flexibilidad al cable y formar mayores áreas de conducción que un solo conductor no podría tener.

Un cable que es de especial interés es el ACSR -- (Aluminium Conductor Steel Reinforced) ó Conductor de Aluminio Reforzado con Acero, en el que a un núcleo de alambres de acero (un alambre ó un grupo) se le trenzan alambres de aluminio que funcionan como conductores.

Es bien sabido que la plata es el mejor conductor que se conoce, sin embargo, su excesivo costo impide su uso para la fabricación de cables. Por tanto, el material de mejor conductividad, después del aluminio es el cobre, -- que por su ductilidad, resistencia a oxidación y corrosión, así como por su gran resistencia mecánica reúne los requisitos para ser usado en la fabricación de la mayoría de los conductores; entre más duro es el cobre tiene menor conductividad.

A manera semejante se usa el aluminio que para una misma capacidad de conducción de corriente pesa la mitad que un conductor de cobre y tiene aproximadamente un 30% menos de resistencia mecánica. Es resistente a la corrosión en buena escala y tiene ductibilidad.

En contraste, los cables de acero galvanizado (para protegerlos de la corrosión), no se usan como conductores por su baja conductividad, facilidad de corrosión y por ser un material magnético causando pérdidas por histeresis.

Su ventaja es que no es muy costoso y tiene una alta resistencia mecánica.

Como una conclusión de las características del cobre, aluminio y acero, se presenta en la página 138 una tabla comparativa de éstos 3 materiales; del cobre se considera al duro y al suave debido a que varían algo sus características.

También se tienen algunas relaciones entre el cobre y el aluminio que pueden servir de base para una adecuada elección:

1.- Para una igual resistencia la relación de áreas es:

$$Al = 1.66 \quad Cu = 1.0$$

2.- Para iguales áreas la relación de pesos es:

$$Al = 1.0 \quad Cu = 3.3$$

	COBRE RECOCIDO	COBRE DURO	ALUMINIO DURO	ACERO
CONDUCTIVIDAD A 20°C (IACS)	100 %	97.3 %	61 %	12.3 %
RESISTIVIDAD A 20°C ( $\Omega/m/mm^2$ )	0.017241	0.01772	0.02828	0.15
DENSIDAD A 20°C	8.89	8.89	2.703	7.83
COEFICIENTE DE VARIA CION DE LA RESISTEN- CIA CON LA TEMPERATU RA A 20°C	0.00393	0.00382	0.00403	0.0042



3.- Para igual área la relación de conductividad es:

$$Al = 1.6$$

$$Cu = 1.0$$

Como se puede observar, la elección de cobre ó aluminio como conductores eléctricos va a depender del tipo de instalación, de la longitud del cable, si va a ser aéreo ó subterráneo y del costo en ése momento, factores que -- van a determinar y definir la elección del material.

#### 6.4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LINEAS DE TRANSMISION.

El diseño de una línea de transmisión puede ser tan complejo como el de otro sistema industrial, pues se tienen que tomar varios factores que van desde la decisión de las características principales de la línea hasta las especificaciones de diseño que toman factores determinantes para el óptimo funcionamiento como son la corrosión, la contaminación, la velocidad del viento, etc., algunos factores son tomados de la experiencia de tener instalados otros sistemas en condiciones similares, mientras que en otros casos se necesitan estudios más profundos, así como análisis estadístico.

En relación a lo anteriormente escrito, es conveniente notar que los avances modernos en los sistemas eléctricos de potencia hagan tener para una misma línea un gran número de posibilidades de diseño, tanto por los materiales como en la disposición del sistema.

Para el diseño de una línea de transmisión se tienen que hacer bastantes análisis y cálculos de Ingeniería, --- auxiliándose cuando es posible por medio de computadora; --- los factores que más se analizan son:

#### 6.4.1. Selección y Análisis del Conductor

Como tratamos en el punto anterior existen diversos factores que conducen a seleccionar un determinado conductor. Las pérdidas de potencia y radiointerferencia, así como la resistencia mecánica que deba tener el conductor, debido a la relación entre las flechas y tensiones (catenaria) que establecen el claro entre torres de transmisión, factor que es determinante para el costo del sistema, pues el tener muchas torres aumenta el precio en un gran porcentaje.

#### 6.4.2. Aislamiento

Aquí nos referimos al aislamiento de la torre de --- transmisión y no al de los conductores, debido a que las líneas aéreas son nuestro principal interés y son normalmente conductores desnudos. El óptimo diseño del aislamiento es necesario para establecer las distancias dieléctricas que rigen el diseño de las estructuras que soportan el cable; un factor que limita las distancias entre torres es el de las condiciones ambientales. Para evitar las descargas atmosféricas están diseñados los hilos de guarda.

#### 6.4.3. Torres de Transmisión

Como ya comentamos las torres son las que dan un mayor costo a los sistemas eléctricos, pues para darles una larga vida, así como un factor de seguridad, tienen que considerarse las condiciones ambientales como son viento, hielo, nieve, etc., también se debe tomar en cuenta la selección de los conductores y el diseño del aislamiento para no hacer la torre con dimensiones sobradas, sino con las óptimas de costo, seguridad y funcionalidad.

Como punto final se listan a continuación todas las consideraciones que se tienen que considerar para el diseño de una línea de transmisión:

- 1.- Condiciones climatológicas y ambientales.
- 2.- Parámetros característicos de la línea de transmisión con respecto a los conductores y su configuración.
- 3.- Diseño del aislamiento de la torre de transmisión.
- 4.- Análisis de la resonancia en las líneas de transmisión y de la radiointerferencia.
- 5.- Estudio de sobretensiones por descargas atmosféricas.
- 6.- Estudio de sobretensiones por maniobra de interruptores.
- 7.- Optimización de las distancias entre torres, así como del tamaño de los conductores.

La real aplicación de los factores anteriores traerá como consecuencia un diseño confiable en funcionamiento, - seguro y sobre todo con los costos actuales económico.

### 6.5 CALCULO MECANICO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION AEREAS.

En este punto se tratan los aspectos generales del cálculo mecánico de la flecha que adopta un conductor en--

tre dos postes ó torres de una línea de transmisión, debi do a cargas uniformemente repartidas a lo largo del cable. Aquí van a surgir algunos conceptos importantes que se de finirán oportunamente.

El diseño de claros ó vanos consiste en determinar - la flecha a la cual el conductor puede llegar debido a -- vientos fuertes, acumulaciones de hielo ó nieve para que el conductor soporte el esfuerzo de tensión al que está - sometido y evitar fallas ó fatigas que causen el poste--- rior deterioro del conductor.

El peso propio del cable así como el hielo, nieve y polvo acumulados en el conductor, son fuerzas que actúan verticalmente, la fuerza del aire actúa horizontalmente y en ángulos rectos al claro, dando resultado una suma vec torial.

Los conceptos importantes en los conductores son el de claro ó vano y flecha:

**claro ó vano:** es la distancia horizontal medida entre los dos postes que sostienen al tramo de cable considerado.

**flecha:** es la distancia vertical medida desde la parte --

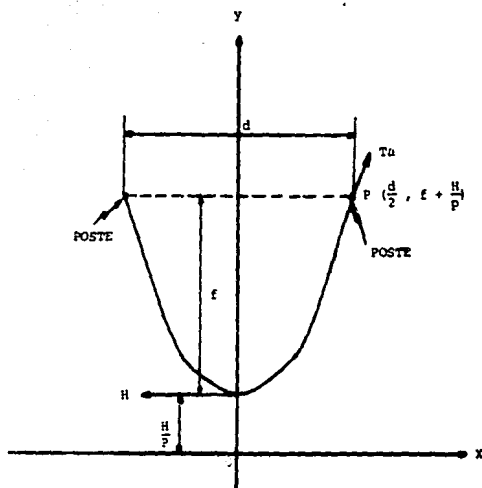
más alta del cable hasta el punto más bajo. La flecha es producida por el peso del cable, hielo, nieve y partículas ajenas.

La curva que se forma entre los dos postes se conoce como "catenaria", aunque también puede analizarse como -- parábola. A continuación se describirán globalmente las fórmulas para el cálculo de flechas por medio del criterio de la catenaria y de la parábola. Para ambos casos - se considerará la presencia del peso propio del cable sin agentes externos y de postes colocados al mismo nivel.

Por medio de la figura 6.7.1. se explican las variables que intervienen en las fórmulas que se citarán a continuación:

Como no es el objetivo de este trabajo, las fórmulas no se demuestran sino solamente se dan las expresiones básicas para el cálculo de la flecha debido a la complejidad de la demostración.

El objetivo de calcular la flecha es debido a que es un parámetro muy importante en las líneas de transmisión, ya que es normalmente la variable que no se coloca.



Donde:

$f$  = FLECHA

$d$  = CLARO O VANO ENTRE POSTES

$T_u$  = TENSION MECANICA EN LOS APOYOS  $P$  y  $P_1$

$H$  = TENSION MECANICA EN EL PUNTO MAS BAJO DEL CABLE

$P$  = PESO DEL CABLE POR UNIDAD DE LONGITUD

$L$  = LONGITUD DEL ARCO DE LA CURVA

FIGURA 6.5.1.

Diagrama de un cable sostenido por dos torres colocadas al mismo nivel.

6.5.1. Fórmulas del Cálculo de la Flecha por Ecuaciones de Catenaria

$$H = T_a - \frac{p^2 d^2}{8T_a}$$

$$f = \frac{H}{P} \left( \cosh \frac{Pd}{2H} - 1 \right)$$

$$\text{donde: } \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

6.5.2. Fórmulas del Cálculo de la Flecha por Ecuaciones de Parábola

$$f = \frac{pd^2}{8H}$$

$$\text{donde: } H = T_a - \frac{p^2 d^2}{8T_a}$$



Las dimensiones comunes de las variables contenidas en las fórmulas son:

$T_a, H$  en kg ó lb

$f, d, l$  en m ó ft

$p$  en kg/m, kg/km ó lb/ft

Un cálculo por medio de las ecuaciones de la catenaria resulta más exacto que usando las fórmulas de parábola.

Los reglamentos de obras e instalaciones dan una altura mínima del cable con respecto al suelo dependiendo del voltaje, sistema y lugar de las torres de transmisión, de ahí observamos un aspecto importante del cálculo de flechas.

## 6.6 CONCLUSIONES.

Las consideraciones y aspectos tratados en este capítulo forman una base importante para el siguiente tema que trata de los cables ópticos instalados en hilos de guarda.

Aunque se trataron puntos aparentemente sin importancia como los antecedentes históricos o el de fuentes de energía, siempre es importante conocer algo de eso.

El saber elegir en determinado momento a un conductor de cobre, aluminio, etc., es indispensable para reducir costos y poder hacer operar al sistema diseñado eficientemente; lo anterior fué dado superficialmente, pero con algunos comentarios importantes para la elección correcta.

Como punto final se dió al cálculo mecánico de la flecha que forma un cable al instalarlo entre dos puntos y se comentaron los aspectos que hacen este cálculo importante.

## VII. CABLES DE FIBRAS OPTICAS INSTALADOS EN LOS HILOS DE GUARDA

### 7.1 INTRODUCCION.

En los primeros capitulos fué analizado ampliamente - el porque era ventajoso instalar cables ópticos en vez de los alambres tradicionales ó inclusive en determinadas circunstancias el uso de microondas, radio, etc., también se se dieron comparaciones estimativas en costo y propiedades, dando como resultado una ventaja notable de las fibras ópticas.

Aquí es importante recalcar que habrá situaciones en que un sistema óptico no resulte costeable ó funcional por tratarse de un sistema determinado con características no

COSTOS DE LOS PROCESOS DE FIBRAS OPTICAS  
ESTIMADOS AL AÑO 2000

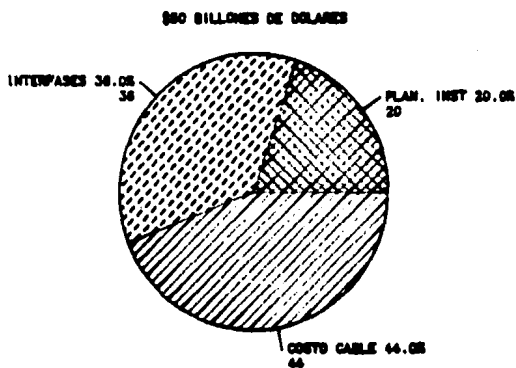


FIGURA 7 1 0

deseables para fibras ópticas.

Ahora toca el analizar los cables de fibras ópticas instalados en líneas aéreas de transmisión, especialmente los que se encuentran en los hilos de guarda. Los objetivos y ventajas de lo anterior serán tratados posteriormente.

Como un antecedente de los costos que se estiman, -- tendrán los procesos de fibras ópticas en el año 2000, se presenta la figura 7.1.B; el costo de lo que es el cable tiende notoriamente a reducirse, pues cada vez se tienen más aplicaciones y por sus ventajas ya conocidas ha sido adoptado para la realización de nuevos proyectos, ó la ampliación de los ya existentes.

Así mismo, sería interesante conocer qué tanto se está usando a las fibras ópticas en los sistemas eléctricos de potencia, tomando en cuenta que ese porcentaje mostrado en la figura 7.1 tiende a subir año con año. Se observa que casi un 70% está aplicado a la telefonía, la cual inclusive ha desplazado a los cables telefónicos convencionales en un buen porcentaje.

Si bien se ha dicho que actualmente la instalación de cables ópticos en líneas aéreas es algo costoso, tam--

# LA INSTALACION DE FIBRAS OPTICAS EN LOS DIFERENTES CAMPOS DE LA INDUSTRIA

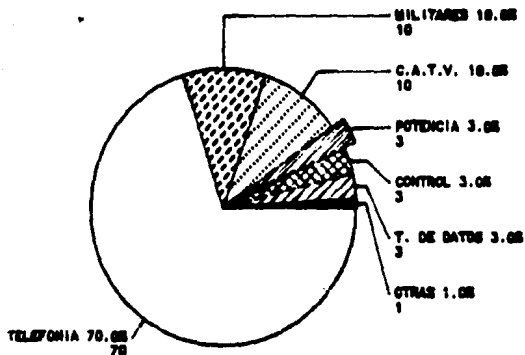


FIGURA 7.1

bién es debido a que prácticamente se está empezando y para llevar tan poco tiempo se tienen avances notables; de lo anterior, está que muchos países hallan instalado algunos sistemas de ése tipo con resultados positivos y a bajo costo.

Como una especie de bosquejo, presentamos a continuación los principales sistemas instalados en el mundo, en México ya se tienen enlaces experimentales que próximamente serán una realidad; a continuación citamos los enlaces más conocidos.

- En 1981 fué instalado en Japón un enlace de 1300 -- metros de longitud, operando con fibras de 1.3  $\mu\text{m}$ .. El -- hilo de guarda se substituyó por otro conductor con la misma finalidad y que permite introducir ó extraer fibras después de ser colocado en la torre.

- En Inglaterra se instaló en 1981 un enlace óptico -- de 21 km. en una línea de transmisión de 400 kV. Como hilo de guarda se utiliza un conductor de calibre y peso --- equivalente diseñado para contener al cable óptico. El -- sistema opera a 1.3  $\mu\text{m}$  y transporta 480 canales de voz a -- una velocidad de 34 Mbits/seg..

- En Suiza fué instalado un enlace de 3.5 km. sobre una línea de 50 kV. El cable óptico consta de un elemento central dieléctrico sobre el cual se extienden las fibras ópticas protegidas por una cubierta extruída. Las fibras son cubiertas con cinta plástica para mantenerlas fijas sobre el elemento central. Este cable ocupa el lugar de una coaxial que cumplía las mismas funciones hasta 1981.

- También en 1981 se instaló un enlace de 2.1 km. de longitud sobre una línea de 110 kV en Alemania para interconectar dos subestaciones. El sistema cuenta con 12 canales que operan a 64 Kbits/seg. en la longitud de onda de 0.85  $\mu$ m.

- Una instalación muy importante pues será parecida a la que estará próximamente en México, fué realizada en Francia en 1984. Se cuenta con un elemento central ranurado (en los diseños convencionales las fibras ópticas se colocan libremente dentro de un delgado tubo extruído que se extiende alrededor de un elemento central metálico). Este sistema fué experimental en una zona montañosa con temperaturas extremas, 500 metros de longitud sobre una línea de 500 kV. y dió excelentes resultados; éste proyecto marca el inicio de nuevas perspectivas dentro de las comunicaciones ópticas en líneas de extra alta tensión.



El análisis anterior deja ver el futuro de éste campo en el que México está teniendo poco a poco mayor participación y buenos resultados en los primeros estudios experimentales que ha probado.

## 7.2 SISTEMAS CONVENCIONALES DE COMUNICACION EN LAS REDES ELECTRICAS.

La mayor demanda de energía eléctrica en los últimos tiempos, así como la complejidad y tamaño de los modernos sistemas, han hecho que se requiera un sistema de comunicación confiable y económico que proporcione un número suficiente de canales para la telefonía, teleprotección, telemetría y telecontrol entre subestaciones, plantas generadoras ó centros de carga, dando como resultado una correcta generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

A continuación se procederá a describir generalmente los medios tradicionales de comunicación para sistemas de potencia, tales como el hilo de guarda aislado, el de onda por línea de alta tensión, el cable aéreo, la radio ó las microondas; también se dará una introducción a sistemas similares con fibras ópticas que son el punto de nuestro estudio.

La elección de un determinado medio de enlace depende de las necesidades de capacidad (número de canales), - confiabilidad requerida, topología y condiciones ambientales del lugar donde se va a instalar el sistema, así como del presupuesto económico.

#### 7.2.1. Onda Portadora por Hilo de Guarda Aislado

Cuando los hilos de guarda se aíslan apropiadamente de sus conexiones a tierra, proporciona aparte de protección a la línea contra descargas atmosféricas un medio para comunicación entre centrales ó subestaciones. El sistema de onda portadora por hilo de guarda aislado (llamado comunmente HGA), trabaja con frecuencias de 6 a 500 -- KHz.

Este tipo de sistema consta de las siguientes partes:

##### a) Equipo terminal

Lo forman los equipos de transmisión y recepción, en el que todas las señales (de telemedición, teleprotección telefónicas, etc.) llegan con la calidad necesaria para - evitar accidentes ó daños a la instalación por una señal que tuvo un error por defectos en la transmisión. Para - éstos sistemas se utilizan esquemas de modulación en banda lateral única para ocupar menor potencia de transmi---

sión ó llaves de frecuencia (FSK) para tener inmunidad al ruido y a la interferencia.

b) Equipo de acoplamiento

Es pequeño y económico ya que no soporta voltajes ó corrientes altas. Estos equipos constan de bobinas, capacitores de acoplamiento transformador de impedancias, - cuchillas de tierra y desconexión. El objeto de éstos -- equipos es para proteger el sistema contra sobretensiones peligrosas.

c) Hilos de guarda

Son aislados a un bajo nivel de 13 a 20 kV para proporcionar el camino más directo a tierra a las descargas atmosféricas ó a las corrientes de falla. Es usual, con el objeto de reducir el ruido, atenuación y pérdidas de - energía, el usar dos hilos de guarda traspuestos.

### 7.2.2. Onda Portadora por Línea de Alta Tensión

Aquí se emplea a la línea de transmisión como medio para la propagación de corrientes de radio de baja frecuencia como canal de comunicación. A éste sistema se le conoce por OPLAT y es ventajoso por su confiabilidad y versatilidad.

Los elementos de que consta éste sistema son semejantes al de HGA con algunas modificaciones:

a) Equipo terminal

Es similar al de HGA

b) Equipos de acoplamiento y sintonización

Consta de trampas de onda, capacitores de acoplamiento y sintonizadores en la línea.

La trampa de onda colocado en serie con la línea y presentando una alta impedancia a la señal de comunicación, evita que ésta se propague en direcciones indeseables.

El capacitor de acoplamiento con sus accesorios (bobinas, cuchillas de tierra, etc.) proporcionan un camino de baja impedancia a la señal de radio frecuencia por acoplar a la línea.

Los sintonizadores de línea se usan para protecciones contra sobretensiones, acopladores de impedancia y atenuadores de señales indeseables.

### c) Líneas de alta tensión

Aquí se realizan estudios para conocer las características de atenuación y ruido en líneas de alta tensión; lo anterior es con el objeto de buscar la frecuencia ideal de transmisión.

Las ventajas de éste sistema son el no necesitar repetidores, el ser mecánicamente resistentes y que al no estar diseñados para utilizarse como líneas de comunicación, si funcionan eficientemente como un medio propagador de ondas.

### 7.2.3. Radio y Microondas

El gran avance en el campo de las microondas y su combinación con la radio forman un importante medio para comunicaciones eléctricas. Se pueden tener un gran número de canales con calidad y confiabilidad excelentes, también se tiene la ventaja de que el sistema de comunicación está separado de la red de potencia y poder aprovecharse un gran espacio de la banda espectral.

Su desventaja es el posible robo ó interferencia de señales causando errores costosos y peligrosos; al usar estaciones repetidoras se corre el riesgo de tener menos confiabilidad por tener más unidades para darles mantenimiento.

#### 7.2.4. Cables Aéreos

Aunque aquí se incluyen los cables ópticos instalados en cables ACSR, más bien queremos dar a entender sus antecesores, es decir pares telefónicos instalados en el interior del hilo de guarda. Estos cables tienen buena confiabilidad, pero presentan la desventaja de la alta -- atenuación, alto costo del cable y el de necesitar repetidores en pequeñas distancias de transmisión.

Como comentamos anteriormente aquí se incluyen los cables ópticos con las ventajas que ya conocemos como inmunidad a interferencias electromagnéticas, gran ancho de banda, bajo costo y facilidad de acoplamiento.

Todas las posibilidades anteriores de elección hacen que las empresas interesadas en instalar un sistema, elijan, dependiendo de factores técnicos, económicos, legales, etc., el sistema que más se adapte a sus necesidades.

#### 7.3 TIPOS DE INSTALACION DE FIBRAS OPTICAS EN LINEAS -- AEREAS.

Una vez analizados los sistemas convencionales para enlazar subestaciones procederemos a describir los 4 tipos de instalación conocidos para instalar fibras ópticas en

líneas aéreas.

Para cada uno de esos 4 métodos se dan las ventajas y desventajas que se tienen, tanto al instalarlos como en -- su funcionamiento.

### 7.3.1. Método de Colgado

Este método consiste en la suspensión de un cable óptico de telecomunicaciones normal de alguno de los conductores de fase ya instalados.

Para éste tipo de instalación se tienen las siguientes ventajas y desventajas:

#### + Ventajas

1. Aprovecha las instalaciones existentes.
2. Si es instalado sobre el conductor de tierra puede no requerir desarrollos adicionales.

#### + Desventajas

1. Suma su peso y el de los herrajes de suspensión al del cable de que se cuelga.
2. Aumenta el área efectiva del conductor del que -- cuelga, incrementando la acción del viento, hielo y nieve.

3. Reduce la distancia eléctrica entre conductores.
4. Requiere desarrollar herrajes de suspensión.
5. Requiere desarrollar el procedimiento de instalación.
6. Temperatura excesiva.

### 7.3.2. Método de Catemaría

Aquí un cable óptico normal es instalado en forma pa  
ralela a las líneas aéreas.

Esta instalación ofrece las siguientes ventajas y --  
desventajas:

#### + Ventajas

1. Aprovecha las instalaciones existentes (postes y torres).
2. Versatil en cuanto a dimensiones, rutas y tipos de instalación.
3. No reduce la distancia eléctrica entre conductores.
4. No está sometido a temperaturas extremas.
5. No carga a ningún conductor.
6. Respeta completamente los libramientos de las to  
rres.
7. Evita realizar modificaciones de diseño.



† Desventajas

1. Incrementa la carga que deben soportar los postes ó torres.
2. Puede requerir el desarrollo de herrajes de suspensión.

7.3.3. Método de Cable de Tierra Optico (OPGW)

La elaboración del presente trabajo tiene su principal objetivo en éste tipo de sistemas, las siglas OPGW --- quieren decir: Optical Ground Wire, ésto es, Cable Optico como Hilo de Tierra.

† Ventajas

1. Ocupa un lugar del hilo de guarda normal.
2. No requiere modificaciones a los diseños de líneas aéreas actuales.
3. Protección mecánica excelente.

† Desventajas

1. Se requiere reemplazar los hilos de guarda originales del sistema, complicando su aceptación.
2. Requiere de cuidados especiales durante su instalación

3. Puede requerir de accesorios especiales.
4. Está sujeto a requerimientos eléctricos y térmicos.

Cabe aclarar que la desventaja 1 es relativa, pues si se piensa este tipo de instalación para un nuevo sistema, sus ventajas y costos de fabricación e instalación resultan excelentes.

#### 7.3.4. Método de Enrollamiento helicoidal

En este tipo de instalación el cable óptico es enrollado directamente sobre alguno de los conductores del sistema; las ventajas y desventajas de este método se describen a continuación.

##### † Ventajas

1. Aprovecha las instalaciones existentes
2. No requiere de herrajes especiales de instalación.
3. Tienen una simple fabricación.

##### † Desventajas

1. Requiere desarrollar una máquina instaladora compleja.

2. Suma su peso al del cable sobre el que es instalado.
3. Requiere accesorios especiales de entrada-salida.
4. Instalación limitada a cables con bajo diámetro.
5. Debido al paso de instalación (longitud de una - vuelta completa), requiere de una mayor longitud que la del cable sobre el que es instalado.

Con lo visto hasta ahora en éste capítulo, nos podemos dar una idea para seleccionar el método más óptimo para comunicar subestaciones eléctricas; también fué importante conocer las ventajas y desventajas de instalar fibras ópticas en el interior de los hilos de guarda de una línea de transmisión que es el punto de mayor interés para nosotros.

#### 7.4 CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO.

A continuación presentamos los aspectos importantes - a considerar cuando se diseña un cable de tierra (hilo de guarda) conteniendo fibras ópticas en su interior.

La estructura metálica de los alambres de tierra, debe diseñarse tomando en cuenta todos los esfuerzos mecánicos que tendrá que soportar durante su vida de servicio.

Especial atención debe darse a la carga de la nieve, aire y variaciones de temperatura que producen elongación en la misma estructura.

El criterio de diseño adoptado es que la máxima elongación de la estructura bajo los esfuerzos mencionados anteriormente, puedan ser contenidos en el rango de elasticidad de los materiales usados.

Más aún, las fibras ópticas deben ser protegidas en un grado tal, que se evite cualquier elongación que afecte las características ópticas ó mecánicas de la fibra.

De cualquier manera, el esfuerzo máximo de tensión permitido está determinado por las características de los materiales metálicos disponibles (acero, aleaciones de aluminio).

Los alambres de tierra ó hilos de guarda están compuestos esencialmente de dos partes: el núcleo de fibras y la estructura metálica que soporta los esfuerzos.

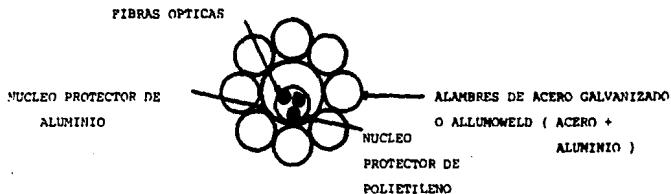
#### 7.4.1. Núcleo Optico

Tomando en cuenta a las grandes deformaciones axiales a que está sujeto el cable, únicamente fibras sueltas

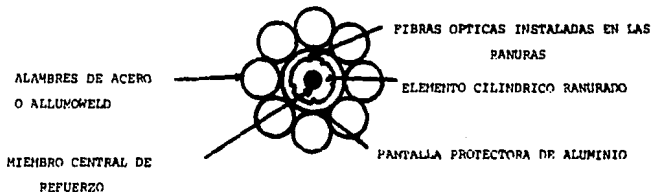
pueden instalarse en el interior del hilo de guarda. Esto es suponiendo que no se tenga un diseño especial que permita evitar los esfuerzos de las fibras, éste diseño consta de un elemento cilíndrico con canales ó ranuras helicoidales, donde son colocadas las fibras, las cuales, al contar con un libre desplazamiento y un recorrido helicoidal, evita los esfuerzos mecánicos, los cuales son absorbidos por el elemento cilíndrico.

Los parámetros incluidos aquí como la profundidad de las ranuras, el diámetro exterior del elemento cilíndrico y la longitud del paso (longitud de una hélice completa), se definen según la aplicación, de manera que las fibras se sometan a los menores esfuerzos mecánicos. El cable cuenta también con cubiertas protectoras contra la humedad temperatura y agentes externos.

También es factible colocar las fibras dentro de un tubo de aluminio (sobre el que serán aplicados los alambres de la estructura metálica). El prototipo anterior puede observarse en la figura 7.4, recordar que los alambres exteriores pueden formarse de 1 ó más capas, según sea el diseño y necesidades.



a) Con pantalla de aluminio exclusivamente.



b) con elemento cilindrico ranurado y pantalla de aluminio.

FIGURA 7.4

Hilo de guarda conteniendo fibras ópticas en su interior con refuerzos internos.

#### 7.4.2. Estructura Metálica

Esta estructura que tiene la función de soportar los esfuerzos mecánicos debidos al propio peso de los alambres de tierra y de los agentes ambientales, está compuesto generalmente por una pantalla metálica (tubo de aluminio) y una armadura de alambres.

Un aspecto de vital importancia para la estructura, es el de soportar la conductividad necesaria para desalojar descargas atmosféricas, rayos, etc. y funcionar eficientemente como hilo de guarda.

##### 7.4.2.1. Pantalla metálica

Una pantalla de aluminio debe ser introducida al hilo de guarda, para proteger el núcleo óptico (en caso de no usarse elemento cilíndrico ranurado) contra las fuerzas de compresión producidas por los alambres de tierra de la estructura; también sirve de protección a las fibras en ambientes salinos.

##### 7.4.2.2. Armadura de alambres

La armadura de alambres cuya función principal es la de hacer la función de un hilo de guarda, puede formarse de una ó más capas de acero, alumoweld (acero+aluminio),

para proteger al acero de corrosión) y/ó aleaciones de -- aluminio que soporten la carga axial mayor.

Aquí es donde juegan un papel importante los cables ACSR (mencionados en el capítulo 6) que se forman por --- alambres de acero sobre los que se aplican alambres de -- aluminio, el objeto del acero es el de soportar los es--- fuerzos mecánicos, pues el aluminio tiene una carga de -- ruptura muy baja, mientras que funciona como conductor, - debido a la mala conductividad del acero.

En lugares salinos se utilizan los cables ACSR-AW, que tienen la ventaja de que los alambres de acero están cubiertos con una capa de aluminio, evitando la corrosión.

Es evidente que al diseñar la carga que debe sopor-- tar el cable de guarda, no tiene que involucrarse para na da el diseño del cable óptico, pues solamente se necesita conocer su carga máxima de ruptura, para conocer la carga final de los hilos de guarda en el que deben considerarse los esfuerzos mecánicos nombrados anteriormente.



## 7.5 CALCULO DEL NUMERO DE HILOS Y PASO DE UNA CORONA -- CERRADA.

Un aspecto muy importante para el desarrollo del presente proyecto es el de conocer la forma en que se pueden calcular el número de alambres que se cablean sobre el tubo de aluminio que contiene las fibras; éste punto es determinante junto con el paso de cableado de los alambres, pues existe un número exacto de alambres que permite que la corona cierre perfectamente. El mayor ó menor número de alambres que caben sobre un núcleo fijo (tubo protector de aluminio), depende del paso de cableado; a menor paso, menor número de alambres, mientras que a mayores pasos de cableado el número de alambres aumenta.

El hecho de que la corona cierre perfectamente, evita problemas de fabricación, instalación y uso, pues aunque es mínimo siempre se reduce el ingreso al tubo de aluminio de agentes externos, también se evita la desfiguración del cable al someterse a esfuerzos mecánicos.

Dependiendo de las necesidades de diseño (mayor conductividad del hilo de guarda, mayor resistencia mecánica del cable), se tendrán una ó más capas de alambres cableados con los tipos de conductores indicados en el punto anterior.

Otro punto importante a considerar es las pérdidas de cableado, esto es, debido a que los conductores van aplicados helicoidalmente, recorren una mayor distancia, al llegar a un punto determinado que si fueran en línea recta; aquí surge otra regla; a mayor paso, menor es el porcentaje de pérdidas de cableado.

A continuación deduciremos las fórmulas más importantes que desglosan lo anteriormente dicho:

Cabe decir, que también es posible obtener el paso de cableado de los alambres, para una corona cerrada de "N" hilos.

"Una corona cerrada de hilos es aquella formada por hilos envueltos helicoidalmente alrededor de un cilindro y estando dichos hilos tangentes entre sí, de manera de no dejar descubierto al cilindro en ningún punto ó también sobrecubierto".

Como punto inicial consideremos un hilo elemental en vuelto helicoidalmente en torno y tangente a un núcleo de dimensiones conocidas (diámetro final) y que podemos apreciar junto con algunas variables en la figura 7.5.a..

En el corte transversal del cable el alambre aparece elíptico y no redondo, lo anterior es debido a que el alambre va helicoidalmente sobre el núcleo y no longitudinalmente.

#### 7.5.1. Pérdidas de Cableado

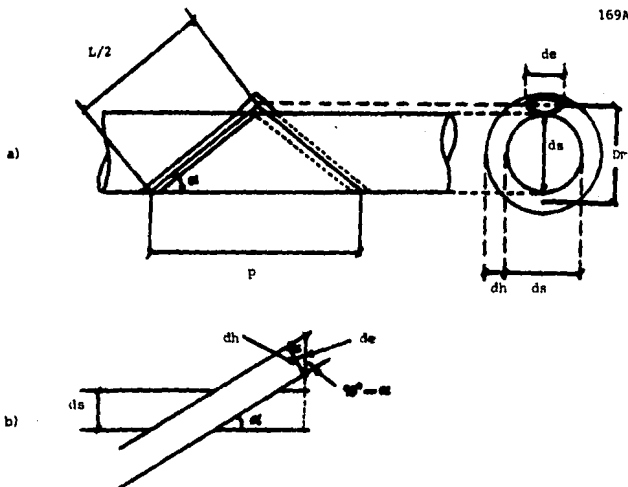
A continuación deduciremos la ecuación que sirve para encontrar las pérdidas de cableado, esto es, el porcentaje de alambre que se necesita de más por recorrer un camino helicoidal.

De la figura 7.5.a. tenemos que:

$$\% Pe = \frac{\text{longitud total}}{\text{longitud real}} = \frac{L}{P}$$

Como el alambre recorre un perímetro para dar una vuelta:

$$L = \% Dm$$



- Donde:
- $d_e$  - diámetro mayor de la elipse que forma un hilo de la corona al hacer un corte transversal.
  - $d_h$  - diámetro de un hilo de la corona.
  - $d_s$  - diámetro del núcleo sobre el que se colocan los alambres.
  - $d_m$  - diámetro medio =  $d_s + d_h$
  - $n$  - número de hilos de la corona.
  - $p$  - paso de cableado (según norma generalmente).
  - $\%P_e$  - porcentaje de pérdidas de cableado.

FIGURA 7.5.a

Representación geométrica de un hilo enrollado helicoidalmente sobre un núcleo.

Aquí usamos  $D_m = ds + dh$ , debido a que es el diámetro real recorrido por el alambre, a  $D_m$  se le llama diámetro medio.

$$\text{Por Pitagoras } L = \sqrt{P^2 + (\sqrt{D_m})^2}$$

$$\% Pe' = \frac{\sqrt{P^2 + (\sqrt{D_m})^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{D_m}}{P}\right)^2}$$

Como es en porcentaje:

$$\% Pe = 100 \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{D_m}}{P}\right)^2} - 1 \right) = 100 \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

$$\text{siendo } \cos \alpha = \frac{P}{L}$$

### 7.5.2. Número de Hilos de la Corona

El número de alambres que caben en una corona sobre un núcleo es:

$$n = \frac{\sqrt{D_m}}{ds} - (a)$$

de la figura 7.5.a.:

$$\cos \alpha = \frac{dh}{de} \quad \therefore \quad de = \frac{dh}{\cos \alpha} \quad - (b)$$

substituyendo b en a

$$n = \frac{f D_m \cos \alpha}{dn} \quad - (c)$$

$$\text{si } \cos \alpha = \frac{1}{\frac{f Pe}{100} + 1} \quad - (d)$$

substituyendo d en c

$$n = \frac{f D_m}{dh \left( \frac{f Pe}{100} H \right)} \quad - (e)$$

$$\text{si } 1 + \frac{f Pe}{100} = \sqrt{1 + \left( \frac{f D_m}{P} \right)^2} \quad - (f)$$

substituyendo f en e

$$n = \frac{\sqrt{Dm}}{dhk} - (g)$$

donde:

$$n = \frac{\sqrt{Dm}}{dhk} - (g)$$

donde:

$$K = \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{Dm}}{P}\right)^2} - (h)$$

### CASO A

Si conocemos el paso de cableado, podemos encontrar el número de hilo de la corona con el siguiente procedimiento:

1.- Obtener K de la ecuación h

2.- Obtener  $n$  de la ecuación g. Aproximar  $n$  al número entero más cercano.

3.- Con el valor de  $n$  ajustado se debe calcular el paso real por las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{\sqrt{Dm}}{dhn} \quad - \quad (i)$$

$$P = \frac{\sqrt{Dmf}}{\sqrt{K^2 + 1}} \quad - \quad (j)$$

donde:

$$f = 2e^{-0.1125n} + 1$$

Cuando  $K$  es menor a 1, el número de hilos propuestos no cabe en la corona, por lo que deberá probarse con el número inmediato inferior.

El parámetro  $f$  es un factor empírico que corrige el error de considerar que los conductores elípticos ( $de$ ) se acomodan en una superficie plana en vez de cilíndrica.



CASO B

Existen ocasiones en que es necesario calcular el paso requerido de cableado de los alambres para tener una corona cerrada de  $n$  hilos.

1.- Obtener  $K$  de la ecuación  $i$ , si es menor 1; reducir  $n$  al número inmediato inferior y volver a probar hasta que  $K$  sea mayor a 1, lo cual significa que los hilos - cabrán en la corona.

2.- Obtener el paso de la ecuación  $j$ .

Aquí hay que tener cuidado de utilizar las mismas unidades en todos los cálculos para evitar errores ó incon--gruencias en los resultados.

#### 7.6 CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE UN HILO DE GUARDA CON FIBRAS OPTICAS.

Como se había comentado anteriormente, el enlace principal que se tiene en el presente trabajo, es el de considerar hilos de guarda formados por una corona de alambres de acero, cableados sobre un tubo de aluminio de un determinado diámetro más 1 capa de alambres de allumoweld, ----

(acero + aluminio) cableados sobre la corona de alambres de acero. Aquí se reduce el método para calcular una carga de ruptura, la cual debe ser mayor que la determinada para que resista el cable. Cabe decir que aquí no es importante conocer como se obtiene la carga de ruptura determinada.

El cálculo del diámetro del núcleo de aluminio, va a depender principalmente de las dimensiones del tubo que aloja a las fibras ópticas, más un diámetro extra a criterio. Aquí el factor económico es importante, pues no es costeable tanto por instalación como por fabricación, el fabricar un hilo de guarda con grandes dimensiones, éstos puntos están fuera del alcance de ésta tesis.

Una buena parte del cálculo necesita el uso de normas, sobre todo para los valores de tensión de los alambres.

Una norma determina valores de diámetros, resistencias, esfuerzos de tensión, etc. que deben cumplir los cables para evitar fallas al instalarlos ó durante su funcionamiento.

La principal norma que vamos a usar es la ASTM ----  
(American Society for Testing and Materials).

A continuación se procede a deducir el método de --- cálculo de las dimensiones del hilo de guarda.

#### 7.6.1. Datos Iniciales

- Diámetro de los alambres; se considera que los --- alambres de acero tienen el mismo diámetro que los de --- allumoweld.

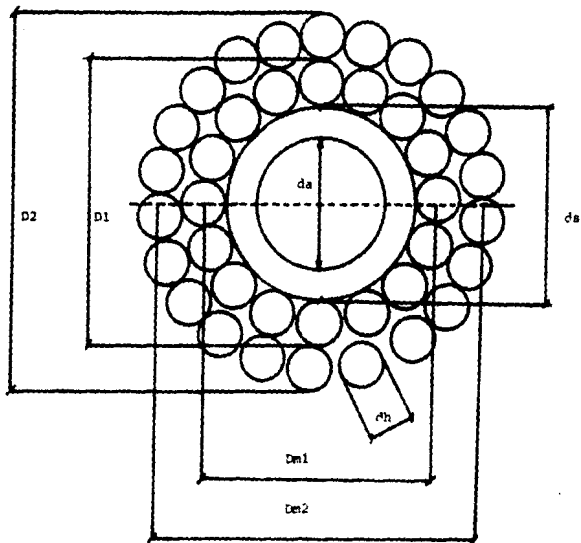
- Diámetro final del núcleo central.

- Pasos de cableado :

La corona externa de hilos de allumoweld debe te--  
ner un paso de 10 a 16 veces, el diámetro máximo de reuni  
do (ver nota A).

La corona interna de hilos de acero debe tener un pa  
so de 10 a 30 veces, el diámetro máximo de reunido (ver -  
nota B).

NOTA A: El diámetro máximo de reunido para la corona exter  
na puede verse en la figura 7.6.1 como D2.



$$D1 = ds + 2dh$$

$$D2 = D1 + 2dh$$

$$Dm1 = ds + dh$$

$$Dm2 = D1 + dh$$

$$As = \frac{\pi(ds^2 - da^2)}{4}$$

; Área del núcleo de aluminio.

$$Ap = \frac{\pi dh^2}{4}$$

; Área de un alambre de acero o aluminio.

FIGURA 7.6.1

Representación del hilo de guarda propuesto para llevar fibras ópticas en su interior, así como de sus variables.

NOTA B: El diámetro máximo de reunido para la corona interna puede verse en la figura 7.6.1. como D1.

En la figura 7.6.1. también puede verse la configuración propuesta del hilo de guarda; considerar que el número de alambres que aparece en la figura es sólo representativo, pues no representa lo que en los cálculos se obtiene.

## 7.6.2. Cálculo y Deducción

### 7.6.2.1. Diámetro medio

Como se observa en la figura 7.6.1.

$$D_{m1} = d_s + d_h$$

$$D_{m2} = D_1 + d_h$$

Recordar que el subíndice 1 se refiere a la corona interna, mientras que el 2 a la corona externa.

### 7.6.2.2. Pérdidas de cableado

$$\% Pe = 100 \left( \sqrt{1 + \left( \frac{D_{m1}}{P} \right)^2} - 1 \right)$$

donde:

$D_m$  puede ser  $D_{m1}$  ó  $D_{m2}$

del punto 7.5

$$K = \sqrt{1 + \left(\frac{fD_m}{P}\right)^2}$$

siendo:

$P$  = paso de cableado

donde  $K$  puede ser  $K_1$  ó  $K_2$  y  $D_m$  puede ser  $D_{m1}$  ó  $D_{m2}$ .

#### 7.6.2.3. Factor de cierre de la corona

teóricamente  $K_0 = \frac{ds}{dh}$  para la corona interna

$K_0 = \frac{Dl}{dh}$  para la corona externa

(ver tabla I)

## 7.6.2.4. Número de hilos de la corona

$$\text{según punto 7.5: } n_1 = \frac{\sqrt{Dm_1}}{dhk_1}$$

$$n_2 = \frac{\sqrt{Dm_2}}{dhk_2}$$

## 7.6.2.5. Carga de ruptura para un alambre

(CRU) Carga de Ruptura Unitaria =  $\sigma$  (alambre) x A --  
(área alambre)

donde:

$\sigma$  es el esfuerzo de tensión de norma que depende del tipo de alambres (ver tabla II).

## 7.6.2.6. Carga de ruptura para el cable de n hilos

Carga de ruptura del cable = (carga de ruptura del alambre) (No. de alambres) (f).

donde:

f es un factor de corrección de la norma (de seguridad).

f2 = 0.90 para alambres allumoweld.

f1 = 0.95 para alambres de acero galvanizado

CRC - carga de ruptura del cable

CRA - carga de ruptura del alambre

$CRC = (CRA \text{ de acero})(n1)(f1) + (CRA \text{ de allumoweld})(n2)(f2)$

siendo:

n1 - número de alambres de acero

n2 - número de alambres de allumoweld

#### 7.6.2.7. Carga de ruptura del tubo de aluminio

(CRT) Carga de ruptura del tubo = esfuerzo de tensión del tubo x área del tubo

El esfuerzo de tensión del tubo depende del espesor - de éste y los valores se encuentran en norma (ver tabla - III).

#### 7.6.2.8. Sentido de cableado de los alambres

Los alambres de allumoweld serán cableados en sentido



derecho, mientras que los de acero en sentido contrario - (izquierdo), esto es con el objeto de dar mayor resistencia al cable. En la figura 7.6.2.8. se pueden observar - éstos sentidos.

### 7.6.3. Tablas usadas en los cálculos

A continuación se detallan las tablas necesarias para realizar los cálculos anteriores, dichas tablas se sacan de la norma que se especifica junto a los valores dados.

TABLA I VALORES DEL FACTOR DE CIERRE DE LA CORONA

NUMERO DE HILOS POR CORONA "n"	$K_o = \frac{ds}{dh}$		
	$\%P_e=0\%$	$\%P_e=3\%$	$\%P_e=6\%$
3	0.154	0.152	0.155
4	0.414	0.432	0.452
5	0.701	0.733	0.767
6	1.000	1.040	1.100
12	2.860	2.970	3.080
18	4.760	4.930	5.100
24	6.660	6.890	7.100
30	8.570	8.850	9.12

Estos valores se substituyan por el factor f de la ecuación j en el punto 7.5.2..

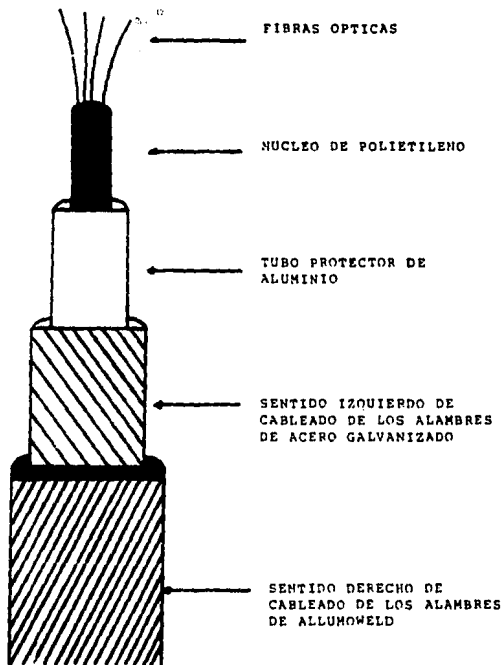


FIGURA 7.6.2.8

Sentido de cableado de los alambres de acero galvanizado y allumoweld.

TABLA II ESFUERZOS DE TENSION DE LOS ALAMBRES

ALAMBRES DE ALLUMOWELD (ASTM - B - 502)

DIAMETRO DE LOS ALAMBRES      ESFUERZOS DE TENSION ( $\sigma$ )  
 (mm)                                      (KGF / mm<sup>2</sup>)

---

1.956 - 3.274	137
3.275 - 3.477	134
3.478 - 3.665	130
3.666 - 3.934	127
3.935 - 4.115	123
4.116 - 4.392	120
4.393 - 4.620	116
4.621 - 4.775	112

ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO (ASTM - B - 498)

DIAMETRO DE LOS ALAMBRES      ESFUERZOS DE TENSION ( $\sigma$ )  
 (mm)                                      (KGF / mm<sup>2</sup>)

---

1.270 - 2.283	148
2.286 - 3.045	143
3.048 - 3.553	143
3.556 - 4.822	141

TABLA III ESFUERZO DE TENSION NUCLEO DE ALUMINIO  
(ASTM - B - 547)

ESPEJOR DEL TUBO (mm)	ESFUERZO DE TENSION ( $\sigma$ ) (KGF / mm <sup>2</sup> )
0 - 6.325	21.8
6.326 - 12.7	22.1

#### 7.6.4. Notas Referentes al Paso de Cableado

Como comentamos en el punto 7.6.1. el paso cubre un papel muy importante en el hilo de guarda.

Procederemos a dar el paso con las variables de la -  
figura 7.6.1..

P1 min = 10D1 P1 max = 30D1 preferente = 18D1

P2 min = 10D2 P2 max = 16D2 preferente = 13.5D2

#### 7.6.5. Carga de Ruptura Total del Hilo de Guarda

La carga de ruptura de todo el hilo de guarda se for-  
ma sumando las cargas de los alambres de acero, aluminio y

y el núcleo de aluminio.

CRC TOTAL = (CRA de acero n1f1) + (CRA de allumoweid n2f2) + CRT tubo de aluminio.

Aquí la carga del tubo de aluminio no lleva factor de corrección, pues es conveniente que tenga el máximo es fuerza posible para darle más protección al núcleo de fibras.

#### 7.6.6. Comparación de Cargas

Si la carga obtenida en el punto anterior es menor que la que se requería por los cálculos mecánicos, hay -- que volver a elaborar los cálculos variando parámetros como diámetro de alambre, resistencia del tubo, etc..

Aquí es importante recalcar que varios datos es necesario suponer y que otros vienen de diseños preliminares no contemplados en éste trabajo; por ejemplo el número de hilos para el cable de guarda va a depender del área de conductividad deseada y de la resistencia mecánica necesaria.

## 7.7 CALCULO DE LA CARGA DE TENSION DEL CONJUNTO DE --- FIBRAS OPTICAS.

Una vez conocida la forma de calcular el hilo de --- guarda, es conveniente definir el procedimiento de cálculo de la carga que puede soportar el núcleo y las fibras contenidas en su interior, con el objeto de evitar daños costosos provocados por fallas durante la instalación ó funcionamiento del cable.

Como recordaremos, nuestro enfoque es el de considerar que dentro del núcleo de aluminio (protector) se coloque un tubo de polipropileno de menor diámetro, dentro del cual serán colocadas de 1 a 4 fibras (pueden ser colocadas más).

Los cables de fibras ópticas son diseñados para soportar una máxima carga durante su instalación, sin exceder a las capacidades del esfuerzo de tensión mínimo de las fibras del cable. El mínimo esfuerzo de tensión para una fibra típica es de 0.5 % cuando mucho.

Debido a las bajas capacidades de elongación y resistencia, es conveniente evitar las cargas significantes a las fibras del cable.

La carga de tensión (T) que un cable óptico puede -- soportar para un esfuerzo mínimo S, ésta dado por la primera aproximación de la expresión:

$$T = S \sum_{i=1}^N E_i A_i \quad - (1)$$

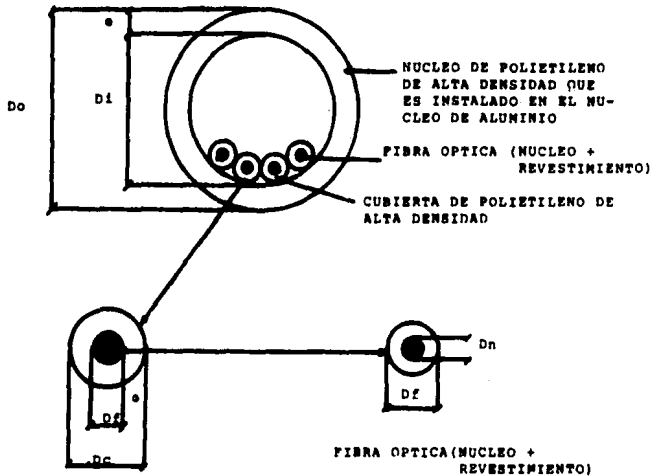
donde:

$E_i$  y  $A_i$  son el módulo de elasticidad y la sección transversal, respectivamente, de cada uno de los elementos que componen al cable (fibras, núcleo protector, - miembro de refuerzo, etc.).

En el párrafo anterior mencionamos un miembro de refuerzo, el cual debe tener el mayor módulo de elasticidad y la suficiente área para soportar la mayor parte de la carga a que va a someterse el cable; éste miembro generalmente es de acero, pero en nuestro diseño la excluirémos, debido a la doble protección de las fibras.

En la figura 7.7.1. podemos observar la propuesta de diseño del cable de fibras ópticas; aquí es bueno recalcar la forma en que se compone el cable:

a) Fibra óptica (núcleo + revestimiento)



FIBRA OPTICA + CUBIERTA

$$A_f = \frac{\pi(D_f - D_n)^2}{4}$$

$$A_c = \frac{\pi(D_c - D_f)^2}{4}$$

$$A_n = \frac{\pi(D_o - D_i)^2}{4}$$

Donde:  $A_f$  - área de la fibra óptica

$A_c$  - área de la cubierta de la fibra óptica

$A_n$  - área del núcleo que contiene a las fibras

$$T = 8 ( N(A_f + A_c) + N_n A_n )$$

FIGURA 7.7.1

Representación de la propuesta del cable de fibras ópticas.



b) Cubierta individual de polietileno de alta densidad para cada una de las N fibras.

c) Núcleo de polietileno de alta densidad en el que son colocadas las N fibras, y al cual es colocado en el núcleo de aluminio del hilo de guarda.

#### 7.7.1. Cálculos Mecánicos del Cable de Fibras Ópticas

Basándonos en la propuesta de diseño del cable de - fibras ópticas de la figura 7.7.1., calcularemos la carga de tensión máxima que puede soportar el cable.

Para poder calcular la carga de tensión, necesitamos conocer los módulos de elasticidad de los materiales usados en el cable de fibras ópticas; dichos valores se encuentran en la siguiente tabla:

TABLA IV

MATERIAL DEL CABLE	MODULO DE ELASTICIDAD Kg/mm <sup>2</sup>
Fibra óptica*	7030
Polietileno de alta densidad	105

\* fabricada con sílice ó fibra de vidrio (núcleo + revestimiento).

La carga de tensión total del cable (T) se forma de la suma de las cargas de las N fibras más la del núcleo - de polietileno, multiplicadas por el mínimo esfuerzo de - tensión en por ciento (s/100).

Generalizando la fórmula 1, tenemos:

$$T = S(NTf + Tn + NTc) = S(N(Tf + Tc) + Tn)$$

donde:

N = número de fibras

Tf = esfuerzo de tensión de una fibra

Tn = esfuerzo de tensión del núcleo

Tc = esfuerzo de tensión de la cubierta de la --  
fibra

S = esfuerzo mínimo de tensión en %/100

Por lo tanto de la figura 7.7.1. y de las áreas de -  
los materiales ahí encontrados, tenemos:

$$T = S(N(EfAf + EcAc) + EnAn)$$

Recordar que  $E_f$ ,  $E_c$  y  $E_n$  son los módulos de elasticidad de la fibra, cubierta de la fibra y del núcleo que -- contiene las fibras respectivamente; dichos valores se -- toman de la tabla dada anteriormente.

Si  $E_f$ ,  $E_c$  ó  $E_n$  están en  $\text{kg}/\text{mm}^2$ , el área de los elementos ( $A_f$ ,  $A_c$  ó  $A_n$ ), deben estar en  $\text{mm}^2$  para que las unidades sean congruentes.

#### 7.7.2. Identificación de las Fibras Ópticas

Un aspecto muy importante es el de reconocer las fibras ópticas que salen del hilo de guarda, debido a que -- cada fibra debe ser conectada a un determinado lugar, dependiendo del punto de partida al entrar en el hilo de -- guarda.

Lo anterior se logra pigmentando con diferentes colores las cubiertas de las fibras ópticas, para lo cual se debe seguir una secuencia de colores, dependiendo del número de fibras.

Existen diversos códigos de colores, pero el más usado se presenta en la figura 7.7.2. en el que en algunos -- casos se usan trazadores, ésto es, una línea de color trazada sobre el color base.

CODIGO DE COLORES PARA IDENTIFICAR LAS FIBRAS

NUMERO DE CONDUCTORES	COLOR BASE	COLOR TRAZADOR
1	negro	--
2	blanco	--
3	rojo	--
4	verde	--
5	naranja	--
6	azul	--
7	blanco	negro
8	rojo	negro
9	verde	negro
10	naranja	negro
11	azul	negro
12	negro	blanco
13	rojo	blanco
14	verde	blanco
15	azul	blanco
16	negro	rojo
17	blanco	rojo
18	naranja	rojo
19	azul	rojo
20	rojo	verde

Figura 7.7.2. Código de colores para la identificación de las fibras ópticas

## 7.8 CALCULO DEL PESO TOTAL DEL CABLE.

El peso total del cable es importante conocerlo, sobre todo para el cálculo de los postes, pues en caso de ser excesivo, se pondrá en duda su instalación aérea por el costo que ésto implica; lo anterior es raro partiendo del punto que se utiliza aluminio con acero, lo cual logra bajo peso, buena conductividad y costo regular.

El peso total del cable se obtiene sumando los pesos individuales de cada uno de los componentes del cable.

Para encontrar los pesos individuales nos basaremos en las figuras 7.6.1. y 7.7.1., donde se encuentran las variables necesarias para deducir las fórmulas.

### 7.8.1. Peso de las Fibras Ópticas

Sabiendo que las fibras se componen de un núcleo de diámetro  $D_n$  y de un revestimiento de diámetro  $D_f$ , y suponiendo que el revestimiento representa el mayor peso, tenemos:

$$W_f = (\rho A_f) N$$

siendo:  $\rho$  densidad del revestimiento

2.34 gr/cm<sup>3</sup> para silicio

2.0 gr/cm<sup>3</sup> para fibra de vidrio

N número de fibras

Af área del revestimiento en mm<sup>2</sup>

Wf peso de l fibra (núcleo + revestimiento)  
en Kg/Km

### 7.8.2. Peso de la Cubierta de las Fibras

El peso de cada cubierta que protege a l fibra es:

$$Wc = (\rho Ac) N$$

siendo:

$\rho$  densidad de la cubierta

0.95 gr/cm<sup>3</sup> para el polietileno de alta densidad

N número de fibras

Ac área de la cubierta en mm<sup>2</sup>

Wc peso de l cubierta en kg/km

### 7.8.3. Peso del Tubo protector de Polietileno

Este tubo es el núcleo en el que se alojan las fibras ópticas:

$$W_n = A_n \rho$$

siendo:

$\rho$  la densidad del núcleo  
 0.95 gr/cm para el polietileno de alta densidad  
 $A_n$  área del tubo en  $\text{mm}^2$   
 $W_c$  peso del núcleo en Kg/Km

#### 7.8.4. Peso del Núcleo protector de Aluminio

En éste tubo se aloja el tubo de polipropileno que contiene a las fibras ópticas.

$$W_s = A_s \rho$$

siendo:

$\rho$  la densidad del núcleo  
 2.703 gr/cm<sup>3</sup> para el aluminio  
 $A_s$  área del tubo en  $\text{mm}^2$   
 $W_s$  peso del núcleo en Kg/km

#### 7.8.5. Peso de los Alambres de Acero Galvanizado

El peso de los alambres de acero se verá afectado -- por las pérdidas de cableado que tienen al cablearse sobre el núcleo de aluminio.

$$Wl = n1 (Ap)(\rho) \left( \frac{\%Pel}{100} + 1 \right)$$

siendo:

$\rho$  la densidad de los alambres de acero

7.78 gr/cm<sup>3</sup> para acero galvanizado

Ap área de 1 alambre en mm<sup>2</sup>

n1 número de alambres de acero

Wl peso de los n1 alambres de acero en Kg/Km

%Pel pérdidas de cableado en %

$$\% Pel = 100 \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\%Dml}{P1} \right)^2} - 1 \right)$$

siendo: P1 = 18 D1

#### 7.8.6. Peso de los Alambres de Allumoweld

Los alambres de allumoweld tendrán un incremento en el peso, debido a ser cableados en forma espiral sobre -- los alambres de acero galvanizado.



$$N2 = n2 (Ap)(\rho)\left(\frac{\%Pe2}{100} + 1\right)$$

siendo:

$\rho$  la densidad de los alambres de allumoweld

6.590 gr/cm<sup>3</sup> para allumoweld

Ap área de 1 alambre en mm<sup>2</sup>

n2 número de alambres de allumoweld

W2 peso de los n2 alambres de allumoweld en --  
Kg/Km

%Pe2 pérdidas de cableado en %

$$\%Pe2 = 100 \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\%Dm2}{p2} \right)^2} - 1 \right)$$

siendo:  $p2 = 10 D2$

En el cálculo de pérdidas de cableado, utilizamos el paso mínimo, por ser la situación más crítica, ésta es, cuando se tienen más pérdidas.

#### 7.8.7. Peso Total del Cable

El peso total será la suma de los pesos individuales.

$$WT = WF + Wc + Wn + Ws + Wl + W2$$

donde:

$W_t$  peso total del cable en Kg/Km

Como una nota importante es bueno recomendar el uso de unidades MKS ó SI como Kg, Km y  $mm^2$  según sea el caso.

### 7.9 EJEMPLO Y PROPUESTA DE DISEÑO.

Una vez especificado el procedimiento de cálculo del cable de fibra óptica y del hilo de guarda, procederemos a dar un ejemplo de diseño, que a la vez es con valores reales que definen una propuesta determinada de un cable.

Aquí es importante recalcar que algunos datos deben ser proporcionados y que son obtenidos por diferentes formas que no son del interés del presente trabajo.

#### 7.9.1. Datos Iniciales.

Se desea un cable que funcione como hilo de guarda, con 4 fibras de índice graduado colocadas en un tubo de polietileno, el cual a su vez, será colocado en un núcleo protector de aluminio; sobre el núcleo de aluminio se cablearán alambres de acero galvanizado para dar resistencia al cable sobre éstos alambres se cablearán alambres -

de allumoweld, para que el aluminio funcione como conduc  
tor para desalojar las descargas atmosféricas y proteger  
a los conductores de fase.

El cable será instalado en un claro de 250 m. entre  
apoyos al mismo nivel y con una tensión en los mismos de  
1,500 kg..

Por algunos estudios preliminares se tienen los si-  
guientes datos:

FIBRAS OPTICAS:

4 fibras de índice graduado de silicio (núcleo + re  
vestimiento)

$D_n = \text{diámetro del núcleo} = 50\mu\text{m}$

$D_f = \text{diámetro del revestimiento} = 125\mu\text{m}$

Las fibras tienen una cubierta individual de polieti-  
leno con un diámetro exterior  $D_c = 500\mu\text{m}$ .

El conjunto de las 4 fibras ópticas son colocadas en  
un tubo de polietileno con los siguientes diámetros.

$D_o = \text{diámetro exterior del tubo} = 25 \text{ mm.}$

$D_i = \text{diámetro interior del tubo} = 2.0 \text{ mm.}$

Considerar 0.5 % el mínimo esfuerzo de tensión de -  
las fibras y del núcleo.

#### NUCLEO DE ALUMINIO:

Un tubo de aluminio con las siguientes dimensiones:

da = diámetro interno = 6.0 mm.

ds = diámetro externo = 10.0 mm.

#### ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO Y ALLUMOWELD:

Los alambres deberán tener un diámetro de 2.5 mm. y cumplir con una carga de ruptura en conjunto de 15,000kg, sin considerar la resistencia que pueda tener el núcleo - de aluminio.

#### 7.9.2. Datos Finales

Se desea que una vez seguidos los procedimientos de diseño especificados en los puntos 7.5 y 7.6, 7.7 y 7.8, se obtengan los siguientes parámetros:

a) flecha que forma el cable.

- b) número de alambres en la corona de acero y de --  
allumoweld
- c) pérdidas de cableado de los alambres de acero y  
de allumoweld.
- d) paso real de cableado de la corona de alambres de  
acero y allumoweld.
- e) cargas de ruptura de los alambres de acero y ---  
allumoweld.
- f) cargas de ruptura del cable de acero de allumoweld  
y total
- g) carga de ruptura del núcleo de aluminio.
- h) sentido de cableado de los alambres.
- i) esfuerzos de tensión de las fibras, cubierta, nú-  
cleo protector y total.
- j) identificación de las fibras.
- k) peso total del cable desglosando los pasos indi-  
viduales.
- l) diámetros y dimensiones necesarias para el cable.

### 7.9.3. Cálculo de Parámetros

#### 7.9.3.1. Fibras Ópticas

$N = 4$	$D_o = 2.5 \text{ mm}$
$D_n = 50 \mu\text{m} = 0.05 \text{ mm}$	$D_i = 2.0 \text{ mm}$
$d_f = 125 \mu\text{m} = 0.125 \text{ mm}$	material núcleo = polietileno de alta densidad

$$D_c = 500 \mu\text{m} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\text{material fibras} = \text{silicio} \quad E_f = 7030 \text{ kg/mm}^2$$

$$S = 0.5\% = 0.005$$

$$E_c = E_n = 105 \text{ kg/mm}^2$$

$$A_f = \frac{\pi(0.125^2 - 0.05^2)}{4} = 0.0103 \text{ mm}^2$$

$$A_c = \frac{\pi(0.5^2 - 0.125^2)}{4} = 0.1841 \text{ mm}^2$$

$$A_n = \frac{\pi(2.5^2 - 2.0^2)}{4} = 1.7671 \text{ mm}^2$$

$$T_f = E_f A_f = (7030)(0.0103) = 72.41 \text{ kg.}$$

$$T_c = E_c A_c = (105)(0.1841) = 19.33 \text{ kg.}$$

$$T_n = E_n A_n = (105)(1.7671) = 185.55 \text{ kg.}$$

$$T = 0.005 (4(72.41+19.33) + 185.55) = 2.77 \text{ kg.}$$

Como observamos al ser tan pequeña la resistencia -- de las fibras con todo y su tubo de polietileno, es necesario colocarlas dentro de un núcleo de aluminio para evitarles daños.

Identificación cubiertas de las fibras:

1 = negro 2 = blanco 3 = rojo 4 = verde

$$\text{espesor cubierta fibras} = \frac{0.5 - 0.125}{2} = 0.188 \text{ mm.}$$

$$\text{espesor tubo polietileno} = \frac{2.5 - 2.0}{2} = 0.25 \text{ mm.}$$

$$W_f = 4(0.0103)(2.34) = 0.096 \text{ kg/km.}$$

$$W_c = 4(0.1841)(0.95) = 0.7 \text{ kg/km.}$$

$$W_n = (1.7671)(0.95) = 1.679 \text{ kg/km.}$$

#### 7.9.3.2. Núcleo de aluminio

$$d_a = 6.0 \text{ mm.}$$

$$d_s = 10.0 \text{ mm.}$$

$$e = \frac{10.0 - 6.0}{2} = 2.0 \text{ mm. de espesor del tubo de -- aluminio}$$

$$CRT = \sigma A_s = (21.8)(50.27) = 1096 \text{ kg.}$$

$$A_s = \frac{\pi(10.0^2 - 6.0^2)}{4} = 50.27 \text{ mm}^2$$

$$W_s = A_s \rho_s = (50.27)(2.703) = 135.9 \text{ kg/km}$$

### 7.9.3.3. Alambres de acero galvanizado

$$d_h = 2.5 \text{ mm}$$

$$D_{m1} = 10 + 2.5 = 12.5 \text{ mm}$$

$$D_1 = 10 + 2(2.5) = 15 \text{ mm}$$

$$A_p = \frac{\pi(2.5)^2}{4} = 4.91 \text{ mm}^2$$

$$P_1 = 18D_1 = 18(15) = 270 \text{ mm preferente}$$

$$P_1 \text{ min.} = 10(15) = 150 \text{ mm}$$

$$P_1 \text{ max.} = 30(15) = 450 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi 12.5}{270}\right)^2} = 1.01 \text{ teórico}$$

$$n_1 = \frac{\pi(12.5)}{(2.5)(1.01)} = 15.55 \text{ por tanto } n_1 = 16$$



$$Kl \text{ real} = \frac{\sqrt{(12.5)}}{(2.5)(16)} = 0.98$$

como  $0.98 < 1$  no caben 16 hilos, por tanto:

$$n1 = 15$$

$$Kl \text{ real} = \frac{\sqrt{(12.5)}}{(2.5)(15)} = 1.05 \text{ (pérdidas de cableado)}$$

$$pl \text{ real} = \frac{\sqrt{(12.5)} (2 e^{-0.1125(15)} + 1)}{\sqrt{(1.05)^2 - 1}}$$

$pl \text{ real} = 168.0 \text{ mm}$ . el cual está dentro de los valores mínimo y máximo.

$$\text{CRA de acero} = (\sigma) (Ap) = (143)(4.91) = 702.1 \text{ kg.}$$

$$\text{valores de la tabla II} \quad \sigma = 143 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{CRC de acero} = (702.1)(15)(0.95) = 10005.0 \text{ kg.}$$

El sentido de cableado debe ser izquierdo.

$$W1 = (15)(4.91)(7.78)(1.05) = 601.5 \text{ kg/km}$$

## 7.9.3.4. Alambres de allumoweld

$$dh = 2.5 \text{ mm.}$$

$$Dm2 = 15 + 2.5 = 17.5 \text{ mm.}$$

$$d2 = 15 + 2(2.5) = 20 \text{ mm.}$$

$$p2 = 13.5 D2 = (13.5)(20) = 270 \text{ mm. preferente}$$

$$p2 \text{ min} = 10 (20) = 200 \text{ mm.}$$

$$p2 \text{ máx} = 16 (20) = 320 \text{ mm.}$$

$$K2 = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot 17.5}{270}\right)^2} = 1.02$$

$$n2 = \frac{(\pi)(17.5)}{(2.5)(1.02)} = 21.56 \text{ por tanto } n2 = 22$$

$$K2 \text{ real} = \frac{(\pi)(17.5)}{(2.5)(22)} = 0.996 \approx 1.00$$

por tanto se pueden dejar 22 ó 21 alambres

$$n2 = 22$$

$$p2 \text{ real} = \frac{(\pi)(17.5)(2 e^{-0.1125(22)} + 1)}{\sqrt{(1.02)^2 - 1}}$$

$p_2$  real = 319.5 mm., lo cual indica que está muy cerca de salirse de norma.

para  $n_1 = 21$ ,  $k_1 = 1.05$ ,  $p_2 = 210$  mm., que quizá sea un valor más aceptable por no estar en el límite de la norma, aunque el peso del cable será mayor, lo cual tendría que evaluarse.

Para nosotros consideraremos 21 alambres.

CRA de allumoweld =  $\sigma_{Ap} = (137)(4.91) = 672.7$  kg.  
de la tabla II  $\sigma = 137$  kg/mm<sup>2</sup>

CRC de allumoweld =  $(672.7)(21)(0.90) = 12714.03$  kg.  
El sentido de cableado debe ser derecho.

$W_2 = (21)(4.91)(6.59)(1.05) = 713.5$  kg.

7.9.3.5. Peso total de todo el cable.

$WT = 0.096 + 0.7 + 1.679 + 135.9 + 601.5 + 713.5$

$WT = 1453.4$  kg/km

## 7.9.4. Cálculo de la Flecha

De las fórmulas del capítulo 6

H (tensión en el punto más bajo de la catenaria) = ?

Ta = 1500 kg.

d = 250 m.

WT = 1453.4 kg/km = 1.453 kg/m.

$$H = 1500 - \frac{(1.453)(250)}{8(1500)} = 1499.9 \text{ kg} = 1500 \text{ kg.}$$

$$f = \frac{1500}{1.453} \left( \frac{e^{0.12} + e^{-0.12}}{2} - 1 \right) = 7.58 \text{ m.}$$

$$x = \frac{WTd}{2H} = \frac{(1.453)(250)}{2(1500)} = 0.12$$

## 7.9.5. Carga de Ruptura Total

CRC = CRC de acero + CRC allumoweld

CRC = 12714 + 10005 = 22719 kg.

De aquí concluimos que estamos sobrados, pues se requería cumplir con 15000 kg. y obtuvimos 22719, lo cual --

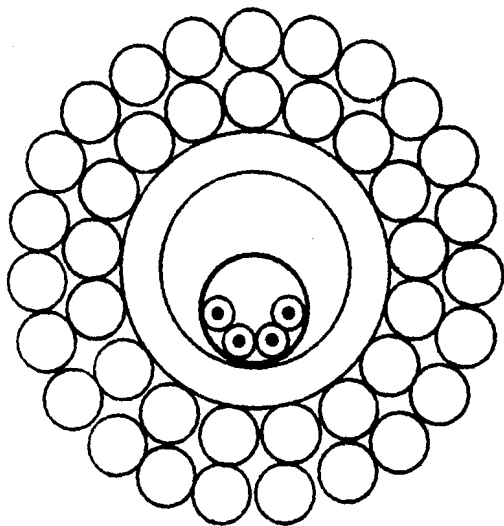


FIGURA 7.9

Representación gráfica de la propuesta de diseño y del cable en general de  
cuarcá conteniendo fibras ópticas en su interior.

indica que es posible optimizar, pues en el diseño ya se consideraron factores de seguridad.

La propuesta de diseño y del cable en general se observa en la figura 7.9.

#### 7.10 CONCLUSIONES.

El punto que concluye el capítulo 7 se pudo observar con el desarrollo de cálculos reales para diseñar un hilo de guarda; se trató de llevar una secuencia lógica y lo más sencilla posible para el mejor entendimiento del diseño.

Se dió un panorama global de todos los sistemas conocidos para transmitir información entre subestaciones y se detallaron los conceptos del sistema elegido para el presente trabajo; fibras ópticas dentro de un hilo de guarda.

Una conclusión importante es que cualquier resultado obtenido puede ser casi siempre minimizado, esto es, tratar de cumplir con los requisitos de diseño con un factor extra de seguridad, pero sin sobrepasarse mucho, pues, se implica un mayor costo tanto en fabricación como en instalación.

## CONCLUSIONES GENERALES

Actualmente el sistema óptimo de transmisión no se forma exclusivamente por fibras ópticas, conectores ópticos, multiplexores ópticos, etc., sino por una combinación de los elementos tradicionales con los ópticos. Lo anterior es debido a que las fibras ópticas todavía están en etapa de crecimiento, pero por todas las ventajas que tienen y el gran avance que han tenido en tan pocos años, en un futuro cercano dominarán ampliamente.

La instalación de fibras ópticas en el interior de los hilos de guarda es conveniente por las siguientes razones:

1.- Una fibra óptica, por su bajo diámetro, puede reemplazar a un cable de cobre de un diámetro mayor; lo anterior implica tener un menor tamaño, peso y sobre todo una reducción en costo.

2.- Para una aplicación como la tratada en este trabajo, las fibras ópticas reducen la posibilidad de cortocircuito; también tienen la ventaja de ser inmunes a las interferencias electromagnéticas generadas por el campo de los conductores de fase, no les afecta el ruido eléctrico.

trico ambiental y tampoco generan ruido propio.

3.- Los sistemas de repetidores casi no son necesarios, por las bajas pérdidas que tienen actualmente las modernas fibras, lo cual representa un ahorro considerable comparado con un sistema convencional de transmisión de información.

4.- El tener un gran ancho de banda permite transmitir mucha información en pocas fibras, lo cual es ventajoso al instalarlas en el interior de los hilos de guarda.

5.- Debido a las altas temperaturas que pueden soportar las fibras ópticas, son muy confiables y seguras para utilizarse en lugares riesgosos en subestaciones eléctricas.

6.- Se pueden producir sistemas económicos, pues la transmisión de corriente y de señales simultáneas reduce costos notablemente.

7.- La posibilidad de error de las fibras ópticas es mínima, por lo que son bastante confiables y en los casos de transmisión de datos confidenciales resulta muy difícil su interferencia.



8.- Los cables ópticos instalados en los hilos de -- guarda son reemplazables en caso de falla ó rotura durante la instalación.

Las expectativas que presenta el sistema tratado son muy buenas, tanto en el mundo como en México, donde ya -- existen enlaces experimentales que funcionarán en muy cor to tiempo.

Pudimos observar toda la variedad de diseños que se pueden tener tanto en la composición de las fibras, como en todo el conjunto de elementos que forman el hilo de -- guarda; lo anterior hace ver que se tiene campo de estudio y experimentación para largo tiempo, pues aquellos -- países ó compañías que se duerman en los sistemas tradicionales tendrán problemas de abastecimiento, mantenimiento y costo de los mismos; por tanto es necesario estar -- preparado para un cambio total ó parcial, pero inminente en muy corto plazo.

Un aspecto de vital importancia para que los sistemas OPGW tengan mayor demanda, es el de no enfocarse solamente a mejorar los cables ópticos y los hilos de guarda en -- sí, sino que también debe buscarse un parejo desarrollo de los dispositivos y accesorios ópticos necesarios para que el sistema de transmisión y recepción de información funcione correcta y optimamente.

## A P E N D I C E A

## PROGRAMA DE COMPUTADORA PARA DISEÑO

A continuación se presenta un programa de computadora en BASIC, elaborado en una IBM-FC con el objeto de demostrar el ejemplo de diseño del punto 7.9; el programa - también puede usarse para rediseñar cables.

El programa contiene condiciones de error, para evitar la introducción y procesamiento de datos erróneos ó fuera de norma.

Se anexa un listado del programa, así como varias -- corridas de diseño en el que una de ellas es la del ejemplo descrito en el punto 7.9, las corridas extras se presentan con datos erróneos para observar el comportamiento del programa ante éstas situaciones.

```

10 REM ***** A P E N D I C E      A *****
20 REM
30 REM PRIMERA PARTE: INTRODUCCION AL PROGRAMA
40 REM DATOS DEL PROGRAMA
50 REM PROGRAMA DE APLICACION PRACTICA DEL TEMA DE TESIS
60 DIM Y$(26);DIM I$(26)
70 CLS
80 PRINT "          PROGRAMA PARA EL CALCULO DE HILOS DE GUARDA CON FIBRAS OPTICAS"
90 PRINT "                      EN SU INTERIOR"
100 PRINT
110 PRINT "UNIVERSIDAD LA SALLE"
120 PRINT "ESCUELA DE INGENIERIA"
130 PRINT "JUAN IGNACIO PEREZ COLLADO";PRINT
140 PRINT "TITULO DE LA TESIS: EMISION-RECEPCION DE SENIALES VIA FIBRAS OPTICAS"
150 PRINT "                      INSTALADAS EN LOS HILOS DE GUARDA DE UNA LINEA --"
160 PRINT "                      DE TRANSMISION"
170 PRINT
180 PRINT "DIRECTOR DE TESIS                ; ING. JOSE ANTONIO TORPES HERNANDEZ"
190 PRINT "DIRECTOR ESCUELA DE INGENIERIA: ING. ARTURO ROJAS DE BENGARDI"
200 FOR I=1 TO 9:PRINT:NEXT I
210 PRINT "PARA EXPLICACION DEL PROGRAMA PRESIONE CUALQUIER TECLA"
220 I$=INKEY$:IF I$="" THEN 220
230 CLS
240 PRINT "EXPLICACION DEL PROGRAMA:"
250 PRINT
260 PRINT "Este programa calcula, en base a una serie de datos de entrada-"
270 PRINT "determinados de antemano, los siguientes parametros, los cuales"
280 PRINT "son necesarios para la fabricacion e instalacion del hilo de --"
290 PRINT "guarda con fibras opticas en su interior:"
300 PRINT
310 PRINT "a) flecha formada por el cable (catenaria).
320 PRINT "b) numero de alambres en cada corona de cable."
330 PRINT "c) cargas de ruptura del cable y de sus elementos individuales."
340 PRINT "d) peso total del cable y de cada uno de sus elementos."
350 PRINT "e) diametros y dimensiones necesarias para la construccion"
360 PRINT "  e instalacion del cable."
370 FOR I=1 TO 9:PRINT:NEXT I
380 PRINT "LA PROPUESTA DE DISEÑO SE EXPLICA PRESIONANDO CUALQUIER TECLA"
390 I$=INKEY$:IF I$="" THEN 390
400 CLS
410 PRINT "EXPLICACION DE LA PROPUESTA DE DISEÑO PARA ESTE PROGRAMA:"
420 PRINT
430 PRINT "El hilo de guarda se forma por un nucleo de aluminio, sobre el"
440 PRINT "cual se cabilan alambres de acero galvanizado para dar resistencia"
450 PRINT "mecanica al cable; sobre estos, se coloca una capa de --"
460 PRINT "alambres de AW (acero-aluminio) para conducir corrientes, al --"
470 PRINT "funcionar como hilo de guarda."
480 PRINT
490 PRINT "En el interior del nucleo de aluminio, se coloca un tubo de --"
500 PRINT "polietileno, dentro de' cual a su vez se colocan N fibras --"
510 PRINT "opticas formadas por nucleo + revestimiento de silicio o fibra"
520 PRINT "de vidrio + cubierta protectora de polietileno."
530 PRINT
540 PRINT "Para mas detalles ver el capitulo VII anexo."
550 FOR I=1 TO 8:PRINT:NEXT I
560 PRINT "PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONE CUALQUIER TECLA"

```

```

570 Z$=INKEY$:IF Z$="" THEN 570
580 CLS
590 REM SEGUNDA PARTE: ENTRADA DE DATOS
600 PRINT "          ENTRADA          DE          DATOS"
610 PRINT
620 PRINT "INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS"
630 PRINT
640 PRINT
650 INPUT "Numero de fibras opticas (1 a 20):" :N
660 IF (N<=1) AND (N<=20) THEN 680
670 PRINT:PRINT "NO ES VALIDO ESE NUMERO, VUELVE A INTENTARLO:" :PRINT:GOTO 650
680 INPUT "Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio:" :M1
690 IF (M1=1) OR (M1=2) THEN 710
700 PRINT:PRINT "NO ES VALIDO ESE NUMERO, VUELVE A INTENTARLO:" :PRINT:GOTO 680
710 INPUT "Diametro del nucleo de la fibra en micrometros:" :DN1
720 INPUT "Diametro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros:" :DF1
730 INPUT "Diametro sobre la cubierta de la fibra en micrometros:" :DC1
740 INPUT "Diametro interno del tubo de polietileno en cm:" :DI
750 INPUT "Diametro externo del tubo de polietileno en cm:" :DO
760 INPUT "Esfuerzo minimo de tension en el tubo y fibras en Kg/cm2" :S
770 INPUT "Claro entre apoyos en cm:" :D
780 INPUT "Tension en los apoyos en kg/cm2" :TA
790 INPUT "Carga de ruptura minima del cable en kg/cm2" :C1
800 INPUT "Diametro interno del nucleo de aluminio en cm:" :DA
810 INPUT "Diametro externo del nucleo de aluminio en cm:" :DS
820 INPUT "Diametro de los alambres de acero y aluminio en cm:" :DH
830 PRINT
840 D$=DN1/1000:DF=DF1/1000:DC=DC1/1000:PRINT:
850 PRINT "DATOS OK."
860 PRINT "PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA"
870 Z$=INKEY$:IF Z$="" THEN 870
880 CLS
890 REM TERCERA PARTE: CALCULO DE PARAMETROS DEL CABLE
900 P1=3.14159278
910 REM FIBRAS OPTICAS
920 AF=(DF^2-DN^2)*P1/4
930 AC=(DC^2-DF^2)*P1/4
940 AD=(DO^2-DI^2)*P1/4
950 AI=DI^2*P1/4
960 AR=DC^2*P1/4+N*1.2
970 IF AR>AI THEN 1980
980 IF (DO>1.2)>DA THEN 2010
990 EF=7020
1000 EC=105:EN=105
1010 TF=EF*AF
1020 TC=EC*AC
1030 TN=EN*AN
1040 T=(S/100)*(N*(TF+TC)+TN)
1050 E1=(DF-DN)/2
1060 E2=(DC-DF)/2
1070 E3=(DO-DI)/2
1080 IF M1=1 THEN RF=2.34 ELSE RF=2
1090 WF=N*AF*RF
1100 WC=N*AC*.95
1110 WN=AN*.95
1120 WF1=WF/N

```

```

1130 WCI=WC/W
1140 W=WF+WC*WN
1150 FOR I=1 TO N
1160 READ Y(I)
1170 DATA "NEGRO", "BLANCO", "ROJO", "VERDE", "NARANJA", "AZUL", "BLANCO", "ROJO"
1180 DATA "VERDE", "NARANJA", "AZUL", "NEGRO", "ROJO", "VERDE", "AZUL", "NEGRO"
1190 DATA "BLANCO", "NARANJA", "AZUL", "ROJO"
1200 NEXT I
1210 RESTORE 1240
1220 FOR I=1 TO N
1230 READ X(I)
1240 DATA **, **, **, **, **, **, "NEGRO", "NEGRO", "NEGRO", "NEGRO", "NEGRO"
1250 DATA "BLANCO", "BLANCO", "BLANCO", "BLANCO", "ROJO", "ROJO", "ROJO", "ROJO"
1260 DATA "VERDE"
1270 NEXT I
1280 REM NUCLEO DE ALUMINIO
1290 E4=(DS-DA1)/2
1300 IF E4<=6.325 THEN ET=21.8 ELSE ET=22.1
1310 IF E4>12.7 THEN 2030
1320 AS=(DS-2-DA-2)*PI/4
1330 CRT=ET*AS
1340 #S=AS*2.703
1350 REM ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO
1360 DM1=DS*DH
1370 D1=DS*2*DH
1380 #P=DM-2*PI/4
1390 P1#10*#D1:P11=30*#D1:P1P=18*#D1
1400 K1=SGR(1+(P1*DM1/P1P)^2)
1410 N1=P1*DM1/DH/K1
1420 NB=FIX(N1)+1
1430 KB=P1*DM1/DH/NB
1440 IF KB<1 THEN NB=FIX(N1)
1450 K7=P1*DM1/DH/NB
1460 P1R=(P1*DM1*(2*EIP(-.1125*NB)+1))/(SGR(K7-2)-1)
1470 IF (P1R*P1#) AND (P1R*P11) THEN 1500
1480 PRINT "LOS PASOS DE CABLEADO ESTAN FUERA DE NORMA"
1490 PRINT "MODIFICA TUS DATOS DE ENTRADA":PRINT:GOTO 580
1500 IF (DM<1.27) OR (DM<4.382) THEN 1510 ELSE 1530
1510 PRINT "LOS ALAMBRES CON ESE DIAMETRO ESTAN FUERA DE NORMA"
1520 PRINT "VUELVE A INTRODUCIR TUS DATOS":PRINT:GOTO 580
1530 IF (DM>=1.27) AND (DM<=2.283) THEN ETA=146
1540 IF (DM>=2.283) AND (DM<=3.553) THEN ETA=143:IF DM>3.553 THEN ETA=141
1550 CRA=#NB*#P*ETA+.95
1560 CRA4=ETA*#P
1570 #1=#NB*#P*7.76*#K7:#6=#P*7.76
1580 REM ALAMBRES DE ALLUMINIO
1590 DM2=D1*CH
1600 D2=DM2*DH
1610 P2#10*#D2:P21=16*#D2:P2P=13.5*#D2
1620 K2=SGR(1+(P2*DM2/P2P)^2)
1630 N2=P2*DM2/DH/K2
1640 NB=FIX(N2)+1
1650 K6=P2*DM2/DH/NB
1660 IF K6<1 THEN NB=FIX(N2)
1670 #3=P2*DM2/DH/NB
1680 P2R=(P2*DM2*(2*EIP(-.1125*NB)+1))/(SGR(K5-2)-1)

```

```

1690 IF (P2R)=P2M) AND (P2R<=P21) THEN 1720
1700 PRINT "LOS PASOS DE CABLEADO ESTAN FUERA DE NORMA"
1710 PRINT "MODIFICA TUS DATOS DE ENTRADA";PRINT;GOTO 580
1720 IF (DH<1.956) OR (DH>4.775) THEN 1730 ELSE 1750
1730 PRINT "LOS ALAMBRES CON ESE DIAMETRO ESTAN FUERA DE NORMA"
1740 PRINT "VUELVE A INTRODUCIR TUS DATOS";PRINT;GOTO 580
1750 IF (DH)=1.956) AND (DH<=3.274) THEN ETW=137
1760 IF (DH>3.274) AND (DH<=3.477) THEN ETW=134
1770 IF (DH>3.477) AND (DH<=3.665) THEN ETW=130
1780 IF (DH>3.665) AND (DH<=3.934) THEN ETW=127
1790 IF (DH>3.934) AND (DH<=4.115) THEN ETW=123
1800 IF (DH>4.115) AND (DH<=4.392) THEN ETW=120
1810 IF (DH>4.392) AND (DH<=4.62) THEN ETW=116
1820 IF DH>4.62 THEN ETW=112
1830 CROW=N5*AP*ETW*.9
1840 CRAW=ETW*AP
1850 W2=N6*AP+.59*K5;W7=AP+.59
1860 WT=W+WS+W1+W2
1870 REM CALCULO DE LA FLECHA
1880 W5=WT/1000
1890 H=TA-(W5*2*D/3/TA)
1900 CX=(EXP(W5*D/2/H)+EXP(-W5*D/2/H))/2
1910 FX=(H/W5)*(CX-1)
1920 CRIC=CRCR+CRCW
1930 IF C1<CRIC THEN 1760 ELSE 1940
1940 PRINT "LA CARGA DE RUPTURA TOTAL DEL CABLE ES MENOR QUE LA REQUERIDA"
1950 PRINT "REDISEÑA EL CABLE INTRODUCIENDO OTROS DATOS";GOTO 580
1960 PRINT;GOTO 2070
1970 REM RUTINAS DE ERROR
1980 PRINT "LAS "I1;" FIBRAS OPTICAS NO CAREN EN EL INTERIOR DEL NUCLEO "
1990 PRINT "PROTECTOR DE POLIETILENO."
2000 PRINT;GOTO 2050
2010 PRINT "EL NUCLEO DE POLIETILENO NO CEE DENTRO DEL TUBO DE ALUMINIO."
2020 PRINT;GOTO 2050
2030 PRINT "NO SE CONTEMPLAN VALORES DE ESFUERZOS DE TENSION PARA ESPEJORES"
2040 PRINT "MAYORES A 12.7 mm DEL NUCLEO DE ALUMINIO.";PRINT
2050 INPUT "SI QUIERES REDISEÑAR EL CABLE PRESIONA LA TECLA S";IVS
2060 IF VS="S" THEN 560 ELSE CLS:STOP
2070 REM CUARTA PARTE: DESPLIEGUE DE RESULTADOS
2080 CLS;PRINT "DESPLIEGUE DE RESULTADOS"
2090 PRINT "-----"
2100 PRINT "FIBRAS OPTICAS";PRINT
2110 PRINT "NUMERO DE FIBRAS OPTICAS" = "I1N"
2120 IF M1=1 THEN M2="SILICIO" ELSE M2="FIBRA DE VIDRIO"
2130 PRINT "MATERIAL DE LA FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO)" = "I1M2"
2140 PRINT "MATERIAL DE LA CUBIERTA DE LA FIBRA" = "POLIETILENO"
2150 PRINT "MATERIAL DEL NUCLEO PROTECTOR DE LAS FIBRAS" = "POLIETILENO"
2160 PRINT "CODIGO DE COLORES DE LAS CUBIERTAS DE LAS FIBRAS";PRINT
2170 PRINT "NUMERO DE FIBRA" COLOR FASE" COLOR TPAZADJR"
2180 PRINT "-----"
2190 PRINT
2200 FOR I=1 TO N
2210 PRINT TAB(6);I;TAB(21);YF(I);TAB(36);JF(I)
2220 NEXT I;PRINT
2230 PRINT "DIAMETRO DEL NUCLEO DE LA FIBRA EN MICROMETROS" = "I0N1"
2240 PRINT "DIAMETRO SOBRE EL REVESTIMIENTO EN MICROMETROS" = "I0F1"

```

2250 PRINT "ESPESOR DEL REVESTIMIENTO EN MM = ";E1  
 2260 PRINT "DIAMETRO SOBRE LA CUBIERTA EN MICROMETROS = ";DC1  
 2270 PRINT "ESPESOR DE LA CUBIERTA EN MM = ";E2  
 2280 PRINT "DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = ";D1  
 2290 PRINT "DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = ";D2  
 2300 PRINT "ESPESOR DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = ";E3  
 2310 PRINT "ESFUERZO MINIMO DE TENSION EN FIBRAS Y TUBO EN KG = ";S  
 2320 PRINT "ESFUERZOS DE TENSION EN KG";PRINT  
 2330 PRINT " FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO) = ";TF  
 2340 PRINT " CUBIERTA DE LA FIBRA = ";TC  
 2350 PRINT " NUCLEO DE POLIETILENO = ";TN  
 2360 PRINT " TOTAL DEL CABLE(FIBRAS+NUCLEO) = ";T  
 2370 PRINT  
 2380 PRINT "PESOS EN KG/KM";PRINT  
 2390 PRINT " FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO) = ";WF1  
 2400 PRINT " CUBIERTA DE LA FIBRA = ";WC1  
 2410 PRINT " NUCLEO DE POLIETILENO = ";WN  
 2420 PRINT " TOTAL DEL CABLE(FIBRAS+NUCLEO) = ";W  
 2430 PRINT  
 2440 PRINT "\*\*\*NUCLEO DE ALUMINIO\*\*";PRINT  
 2450 PRINT "DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO EN MM = ";DA  
 2460 PRINT "DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO EN MM = ";DS  
 2470 PRINT "ESPESOR DEL NUCLEO EN MM = ";E4  
 2480 PRINT "CARGA DE RUPTURA DEL TUBO EN KG = ";CAR  
 2490 PRINT "PESO DEL TUBO EN KG/KM = ";WS  
 2500 PRINT  
 2510 PRINT "\*\*\*ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO\*\*";PRINT  
 2520 PRINT "DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM = ";DH  
 2530 PRINT "DIAMETRO MEDIO EN MM = ";DM1  
 2540 PRINT "DIAMETRO DE REUNIDO EN MM = ";D1  
 2550 PRINT "AREA DEL ALAMBRE EN MM2 = ";AP  
 2560 PRINT "PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM = ";P1M  
 2570 PRINT "PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM = ";P1X  
 2580 PRINT "PASO REAL DE CABLEADO EN MM = ";P1R  
 2590 PRINT "PERDIDAS DE CABLEADO EN % = ";(K7-1)\*100  
 2600 PRINT "NUMERO DE ALAMBRES = ";N9  
 2610 PRINT "CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG = ";CRAA  
 2620 PRINT "CARGA DE RUPTURA DE LOS ";N9;" ALAMBRES EN KG = ";CRCA  
 2630 PRINT "PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM = ";W9  
 2640 PRINT "PESO TOTAL DEL CABLE DE ACERO EN KG/KM = ";W1  
 2650 PRINT "SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMBRES = ";ZQUIERDO"  
 2660 PRINT  
 2670 PRINT "\*\*\*ALAMBRES DE ALLUMWELD (ACERO + ALUMINIO)\*\*";PRINT  
 2680 PRINT "DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM = ";DH  
 2690 PRINT "DIAMETRO MEDIO EN MM = ";DM2  
 2700 PRINT "DIAMETRO DE FEUNIDO EN MM = ";D2  
 2710 PRINT "AREA DEL ALAMBRE EN MM2 = ";AP  
 2720 PRINT "PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM = ";P2M  
 2730 PRINT "PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM = ";P2X  
 2740 PRINT "PASO REAL DE CABLEADO EN MM = ";P2R  
 2750 PRINT "PERDIDAS DE CABLEADO EN % = ";(K5-1)\*100  
 2760 PRINT "NUMERO DE ALAMBRES = ";N6  
 2770 PRINT "CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG = ";CRAH  
 2780 PRINT "CARGA DE RUPTURA DE LOS ";N6;" ALAMBRES EN KG = ";CRCH  
 2790 PRINT "PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM = ";W7  
 2800 PRINT "PESO TOTAL DEL CABLE DE ALLUMWELD EN KG/KM = ";W2

```

2810 PRINT "SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMERES           = DERECHO"
2820 PRINT
2830 PRINT "PESO DEL CABLE(FIBRAS+NUCLEOS+ALAMBRES) EN KG/KM= ";WT
2840 PRINT
2850 PRINT "CARGA DE RUPTURA MINIMA DEL CABLE EN KG       = ";C1
2860 PRINT "CARGA DE RUPTURA CALCULADA DEL CABLE EN KG     = ";CRTC
2870 PRINT
2880 PRINT "••FLECHA DEL CABLE••";PRINT
2890 PRINT "      CLARO ENTRE APOYOS EN M                          = ";D
2900 PRINT "      TENSION EN LOS APOYOS EN KG                       = ";TA
2910 PRINT "      TENSION EN LA PARTE MAS BAJA DEL CABLE KG        = ";H
2920 PRINT "      LONGITUD DE LA FLECHA EN M                       = ";FX
2930 PRINT
2940 PRINT
2950 INPUT "PARA ELABORAR OTRO DISEÑO PRESIONAR LA TECLA D";J#
2960 IF J#="D" THEN 580
2970 END

```



PROGRAMA PARA EL CALCULO DE HILOS DE GUARDA CON FIBRAS OPTICAS  
EN SU INTERIOR

UNIVERSIDAD LA SALLE  
ESCUELA DE INGENIERIA  
JUAN IGNACIO PEREZ COLLADO

TITULO DE LA TESIS: EMISION-RECEPCION DE SENIALES VIA FIBRAS OPTICAS  
INSTALADAS EN LOS HILOS DE GUARDA DE UNA LINEA -  
DE TRANSMISION

DIRECTOR DE TESIS : ING. JOSE ANTONIO TORRES HERNANDEZ  
DIRECTOR ESCUELA DE INGENIERIA: ING. ARTURO ADJAS DE BENGARDI

PARA EXPLICACION DEL PROGRAMA PRESIONE CUALQUIER TECLA

**EXPLICACION DEL PROGRAMA:**

Este programa calcula, en base a una serie de datos de entrada-determinados de anteaño, los siguientes parámetros, los cuales son necesarios para la fabricación e instalación del hilo de guarda con fibras ópticas en su interior:

- a) flecha formada por el cable (catenaria).
- b) número de alambres en cada corona del cable.
- c) cargas de ruptura del cable y de sus elementos individuales.
- d) peso total del cable y de cada uno de sus elementos.
- e) diámetros y dimensiones necesarias para la construcción e instalación del cable.

LA PROPUESTA DE DISEÑO SE EXPLICA PRESIONANDO CUALQUIER TECLA

**EXPLICACION DE LA PROPUESTA DE DISEÑO PARA ESTE PROGRAMA:**

El hilo de guarda se forma por un nucleo de aluminio, sobre el cual se cablean alambres de acero galvanizado para dar resistencia mecanica al cable; sobre estos, se cablea una capa de alambres de AA (acero+aluminio) para conducir corrientes, al funcionar como hilo de guarda.

En el interior del nucleo de aluminio, se coloca un tubo de polietileno, dentro del cual a su vez se colocan N fibras opticas formadas por nucleo + revestimiento de silicio o fibra de vidrio + cubierta protectora de polietileno.

Para mas detalles ver el capitulo VII anexo.

**PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA**

## ENTRADA DE DATOS

INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 4  
Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio:? 1  
Diametro del nucleo de la fibra en micrometros:? 50  
Diametro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros:? 125  
Diametro sobre la cubierta de la fibra en micrometros:? 500  
Diametro interno del tubo de polietileno en mm:? 2.0  
Diametro externo del tubo de polietileno en mm:? 2.5  
Esfuerzo minimo de tension en el tubo y fibras en kg/? 0.5  
Claro entre apoyos en m:? 250  
Tension en los apoyos en kg:? 1500  
Carga de ruptura minima del cable en kg:? 15000  
Diametro interno del nucleo de aluminio en mm:? 6.0  
Diametro externo del nucleo de aluminio en mm:? 10.0  
Diametro de los alambres de acero y aluacoweld en mm:? 2.5

DATOS OK,  
PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA

DESPLIEGUE DE RESULTADOS

••FIBRAS OPTICAS••

NUMERO DE FIBRAS OPTICAS = 4  
 MATERIAL DE LA FIBRA (NUCLEO+REVESTIMIENTO) = SILICIO  
 MATERIAL DE LA CUBIERTA DE LA FIBRA = POLIETILENO  
 MATERIAL DEL NUCLEO PROTECTOR DE LAS FIBRAS = POLIETILENO  
 CODIGO DE COLORES DE LAS CUBIERTAS DE LAS FIBRAS:

NUMERO DE FIBRA	COLDR BASE	COLOR TRAZADOR
1	NEGRO	
2	BLANCO	
3	ROJO	
4	VERDE	

DIAMETRO DEL NUCLEO DE LA FIBRA EN MICROMETROS = 50  
 DIAMETRO SOBRE EL REVESTIMIENTO EN MICROMETROS = 125  
 ESPESOR DEL REVESTIMIENTO EN MM = .0375  
 DIAMETRO SOBRE LA CUBIERTA EN MICROMETROS = 500  
 EL.ESOP. DE LA CUBIERTA EN MM = .1875  
 DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = 2  
 DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = 2.5  
 ESPESOR DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM = .25  
 ESFUERZO MINIMO DE TENSION EN FIBRAS Y TUBO EN % = .5  
 ESFUERZOS DE TENSION EN KG:

FIBRA (NUCLEO+REVESTIMIENTO)	= 72.46771
CUBIERTA DE LA FIBRA	= 19.32916
NUCLEO DE POLIETILENO	= 185.5303
TOTAL DEL CABLE (FIBRAS+NUCLEO)	= 2.763667

PESOS EN KG/KM:

FIBRA (NUCLEO+REVESTIMIENTO)	= 2.412154E-02
CUBIERTA DE LA FIBRA	= .1748736
NUCLEO DE POLIETILENO	= 1.679789
TOTAL DEL CABLE (FIBRAS+NUCLEO)	= 2.47477

••NUCLEO DE ALUMINIO••

DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO EN MM = 6  
 DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO EN MM = 10  
 ESPESOR DEL NUCLEO EN MM = 2  
 CARGA DE RUPTURA DEL TUBO EN KG = 1095.788  
 PESO DEL TUBO EN KG/KM = 135.8676

••ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO••

DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM = 2.5  
 DIAMETRO MEDIO EN MM = 12.5  
 DIAMETRO DE REUNIDO EN MM = 15

AREA DEL ALAMBRE EN MM2	=	4.908739
PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM	=	150
PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM	=	450
PASO REAL DE CABLEADO EN MM	=	173.0729
PERDIDAS DE CABLEADO EN %	=	4.719758
NUMERO DE ALAMBRES	=	15
CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG	=	701.9496
CARGA DE RUPTURA DE LOS 15 ALAMBRES EN KG	=	10002.79
PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM	=	38.18999
PESO TOTAL DEL CABLE DE ACERO EN KG/KM	=	599.6369
SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMBRES	=	IZQUIERDO

••ALAMBRES DE ALLUMOWELD (ACERO + ALUMINIO)••

DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM	=	2.5
DIAMETRO MEDIO EN MM	=	17.5
DIAMETRO DE REUNIDO EN MM	=	20
AREA DEL ALAMBRE EN MM2	=	4.908739
PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM	=	200
PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM	=	320
PASO REAL DE CABLEADO EN MM	=	210.184
PERDIDAS DE CABLEADO EN %	=	4.719758
NUMERO DE ALAMBRES	=	21
CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG	=	672.4972
CARGA DE RUPTURA DE LOS 21 ALAMBRES EN KG	=	12710.2
PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM	=	32.34859
PESO TOTAL DEL CABLE DE ALLUMOWELD EN KG/KM	=	711.3826
SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMBRES	=	DERECHO

PESO DEL CABLE (FIBRAS+NUCLEOS+ALAMBRES) EN KG/KM= 1449.612

CARGA DE RUPTURA MINIMA DEL CABLE EN KG	=	15000
CARGA DE RUPTURA CALCULADA DEL CABLE EN KG	=	22712.98

••FLECHA DEL CABLE••

CLARO ENTRE APOYOS EN M	=	250
TENSION EN LOS APOYOS EN KG	=	1500
TENSION EN LA PARTE MAS BAJA DEL CABLE KG	=	1499.956
LONBITUS DE LA FLECHA EN M	=	7.559467

PARA ELABORAR OTRO DISEÑO PRESIONAR LA TECLA D? D

## ENTRADA DE DATOS

INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 1030

NO ES VALIDO ESE NUMERO, VUELVE A INTENTARLO

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 10

Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio: ? 4

NO ES VALIDO ESE NUMERO, VUELVE A INTENTARLO

Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio: ? 1

Diámetro del núcleo de la fibra en micrometros: ? 75

Diámetro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros: ? 150

Diámetro sobre la cubierta de la fibra en micrometros: ? 600

Diámetro interno del tubo de polietileno en mm: ? 143.6

Diámetro externo del tubo de polietileno en mm: ? 4.0

Esfuerzo mínimo de tensión en el tubo y fibras en %: ? 0.4

Clara entre apoyos en m: ? 300

Tensión en los apoyos en kg: ? 1800

Carga de ruptura mínima del cable en kg: ? 10000

Diámetro interno del núcleo de aluminio en mm: ? 4.1

Diámetro externo del núcleo de aluminio en mm: ? 132.0

Diámetro de los alambres de acero y aluminoweld en mm: ? 3.5

DATOS OK,

PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA

EL NUCLEO DE POLIETILENO NO CABE DENTRO DEL TUBO DE ALUMINIO.

SI QUIERES REDISEÑAR EL CABLE PRESIONA LA TECLA S: ? S

## ENTRADA DE DATOS

INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 12  
Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio:? 1  
Diaetro del nucleo de la fibra en micrometros:? 55  
Diaetro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros:? 150  
Diaetro sobre la cubierta de la fibra en micrometros:? 500  
Diaetro interno del tubo de polietileno en mm:? 3.0  
Diaetro externo del tubo de polietileno en mm:? 4.5  
Esfuerzo minimo de tension en el tubo y fibras en %:? 0.4  
Carga entre apoyos en N:? 350  
Tension en los apoyos en kg:? 2000  
Carga de ruptura minima del cable en kg:? 12500  
Diaetro interno del nucleo de aluminio en mm:? 8.0  
Diaetro externo del nucleo de aluminio en mm:? 12.0  
Diaetro de los alambres de acero y aluminoweld en mm:? 4.4

DATOS OK.  
PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA



LOS ALAMBRES CON ESE DIAMETRO ESTAN FUERA DE NORMA  
VUELVE A INTRODUCIR TUS DATOS

## ENTRADA DE DATOS

INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 15  
Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrios? 2  
Diametro del nucleo de la fibra en micrometros? 60  
Diametro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros? 155  
Diametro sobre la cubierta de la fibra en micrometros? 480  
Diametro interno del tubo de polietileno en mm? 3  
Diametro externo del tubo de polietileno en mm? 4.5  
Esfuerzo sinic de tension en el tubo y fibras en kg? .35  
Carga entre apoyos en kg? 330  
Tension en los apoyos en kg? 2500  
Carga de ruptura sinica del cable en kg? 11000  
Diametro interno del nucleo de aluminio en mm? 8  
Diametro externo del nucleo de aluminio en mm? 12.5  
Diametro de los alambres de acero y alluzoweld en mm? 4.1

DATOS OK.

PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA

LOS PASOS DE CABLEADO ESTAN FUERA DE NORMA  
MODIFICA TUS DATOS DE ENTRADA

## ENTRADA DE DATOS

INTRODUCIR LOS DATOS DE ENTRADA, EN LAS UNIDADES INDICADAS

Numero de fibras opticas (1 a 20):? 16  
 Material de la fibra: 1) silicio 2) fibra de vidrio:? 2  
 Diametro del nucleo de la fibra en micrometros:? 60  
 Diametro sobre el revestimiento de la fibra en micrometros:? 150  
 Diametro sobre la cubierta de la fibra en micrometros:? 490  
 Diametro interno del tubo de polietileno en mm:? 3.1  
 Diametro externo del tubo de polietileno en mm:? 4.5  
 Esfuerzo minimo de tension en el tubo y fibras en %:? 0.3  
 Claro entre apoyos en m:? 330  
 Tension en los apoyos en kg:? 2500  
 Carga de ruptura minima del cable en kg:? 10000  
 Diametro interno del nucleo de aluminio en mm:? 8.0  
 Diametro externo del nucleo de aluminio en mm:? 12.5  
 Diametro de los alambres de acero y allsweld en mm:? 3.9

DATOS OK,  
 PARA EJECUTAR EL PROGRAMA PRESIONAR CUALQUIER TECLA

DESPLIEGUE DE RESULTADOS

••FIBRAS OPTICAS••

NUMERO DE FIBRAS OPTICAS                   ▪ 16  
 MATERIAL DE LA FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO)   ▪ FIBRA DE VIDRIO  
 MATERIAL DE LA CUBIERTA DE LA FIBRA       ▪ POLIETILENO  
 MATERIAL DEL NUCLEO PROTECTOR DE LAS FIBRAS   ▪ POLIETILENO  
 CODIGO DE COLORES DE LAS CUBIERTAS DE LAS FIBRAS:

NUMERO DE FIBRA	COLOR BASE	COLOR TRAZADOR
1	NEGRO	
2	BLANCO	
3	ROJO	
4	VERDE	
5	NARANJA	
6	AZUL	
7	BLANCO	NEGRO
8	ROJO	NEGRO
9	VERDE	NEGRO
10	NARANJA	NEGRO
11	AZUL	NEGRO
12	NEGRO	BLANCO
13	ROJO	BLANCO
14	VERDE	BLANCO
15	AZUL	BLANCO
16	NEGRO	ROJO

DIAMETRO DEL NUCLEO DE LA FIBRA EN MICROMETROS   ▪ 60  
 DIAMETRO SOBRE EL REVESTIMIENTO EN MICROMETROS   ▪ 150  
 ESPESOR DEL REVESTIMIENTO EN MM                   ▪ .045  
 DIAMETRO SOBRE LA CUBIERTA EN MICROMETROS       ▪ 490  
 ESPESOR DE LA CUBIERTA EN MM                     ▪ .17  
 DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM▪ 3.1  
 DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM▪ 4.6  
 ESPESOR DEL NUCLEO DE POLIETILENO EN MM       ▪ .75  
 ESFUERZO MINIMO DE TENSION EN FIBRAS Y TUBO EN %▪ .3  
 ESFUERZOS DE TENSION EN KG:

FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO)	▪ 104.3535
CUBIERTA DE LA FIBRA	▪ 17.94478
NUCLEO DE POLIETILENO	▪ 952.4916
TOTAL DEL CABLE(FIBRAS+NUCLEO)	▪ 3.727792

PESOS EN KG/KM:

FIBRA(NUCLEO+REVESTIMIENTO)	▪ 2.968805E-02
CUBIERTA DE LA FIBRA	▪ .1623575
NUCLEO DE POLIETILENO	▪ 8.617782
TOTAL DEL CABLE(FIBRAS+NUCLEO)	▪ 11.69051

••NUCLEO DE ALUMINIO••

DIAMETRO INTERNO DEL NUCLEO EN MM	=	8
DIAMETRO EXTERNO DEL NUCLEO EN MM	=	12.5
ESFESOR DEL NUCLEO EN MM	=	2.25
CARGA DE RUPTURA DEL TUBO EN KG	=	1579.475
PESO DEL TUBO EN KG/KM	=	195.8404

••ALAMBRES DE ACERO GALVANIZADO••

DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM	=	3.9
DIAMETRO MEDIO EN MM	=	16.4
DIAMETRO DE REUNIDO EN MM	=	20.3
AREA DEL ALAMBRE EN MM <sup>2</sup>	=	11.94591
PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM	=	203
PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM	=	509
PASO REAL DE CABLEADO EN MM	=	416.9648
PERDIDAS DE CABLEADO EN %	=	1.621333
NUMERO DE ALAMBRES	=	13
CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG	=	1684.373
CARGA DE RUPTURA DE LOS 13 ALAMBRES EN KG	=	20802
PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM	=	92.93916
PESO TOTAL DEL CABLE DE ACERO EN KG/KM	=	1227.901
SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMBRES	=	IZQUIERDO

••ALAMBRES DE ALLUMOWELD (ACERO + ALUMINIO)••

DIAMETRO DEL ALAMBRE EN MM	=	3.9
DIAMETRO MEDIO EN MM	=	24.2
DIAMETRO DE REUNIDO EN MM	=	28.1
AREA DEL ALAMBRE EN MM <sup>2</sup>	=	11.94591
PASO MINIMO DE CABLEADO EN MM	=	281
PASO MAXIMO DE CABLEADO EN MM	=	449.6
PASO REAL DE CABLEADO EN MM	=	409.4009
PERDIDAS DE CABLEADO EN %	=	2.599919
NUMERO DE ALAMBRES	=	19
CARGA DE RUPTURA DE UN ALAMBRE EN KG	=	1517.13
CARGA DE RUPTURA DE LOS 19 ALAMBRES EN KG	=	28942.93
PESO DE UN ALAMBRE EN KG/KM	=	78.72353
PESO TOTAL DEL CABLE DE ALLUMOWELD EN KG/KM	=	1534.635
SENTIDO DE CABLEADO DE LOS ALAMBRES	=	DERECHO

PESO DEL CABLE (FIBRAS+NUCLEOS+ALAMBRES) EN KG/KM= 2969.967

CARGA DE RUPTURA MINIMA DEL CABLE EN KG	=	10000
CARGA DE RUPTURA CALCULADA DEL CABLE EN KG	=	46744.93

••FLECHA DEL CABLE••

ESPACIO ENTRE APOYOS EN M	=	330
TENSION EN LOS APOYOS EN KG	=	2500
TENSION EN LA PARTE MAS BAJA DEL CABLE KG	=	2499.955
LONGITUD DE LA FLECHA EN M	=	16.22424

PARA ELABORAR OTRO DISEÑO PRESIONAR LA TECLA D? N  
04

## A P E N D I C E    B

### ESPECIFICACION TIPICA DE UN CABLE DE GUARDA CON FIBRAS OPTICAS

Como manera de ejemplo se presenta una especificación típica de un cable óptico contenido en el interior de un - hilo de guarda.

TIPO	UNIDADES	VALORES
Area nominal	mm <sup>2</sup>	70
A) fibra óptica:		
diámetro núcleo	µm	50
diámetro revestimiento	µm	125
diámetro cubierta	µm	800
ancho de banda	MHz-Km	Min 300 a 0.8 µm
pérdidas	dB/Km	Máx 3.0 a 0.85 µm
B) OP unit:		
número de fibras		3
diámetro del tubo de aluminio		
externo	mm	5.2
interno	mm	4.2

TIPO	UNIDADES	VALORES
C) Cable de guarda:		
No. y diámetro de los alambres	No. /mm	8/3.2 AW
diámetro exterior	mm	11.4
área transversal		
AW	mm <sup>2</sup>	61.16
tubo	mm <sup>2</sup>	7.38
carga de ruptura	Kg	7520 min.
resistencia D.C. a 20°C	Ω/Km	1.05
peso	Kg/Km	411.3
módulo de elasticidad	Kg/mm <sup>2</sup>	13900
capacidad de corriente	A	156
máxima tensión	Kg	1928



## G L O S A R I O

- ACSR - Aluminium Conductor Steel Reinforced ó Conductor - de Aluminio Reforzado con acero, el cual se usa en líneas aéreas.
- ALC - Automatic Level Control ó Control Automático de nivel, usado para ajustar la ganancia en un amplificador.
- ancho de banda (BW) - Diferencia entre las frecuencias superior e inferior de corte de un dispositivo electrónico.
- APD'S - Avalanche Photodiode ó Fotodiodo de Avalanche, -- usado como detector de señales ópticas.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, norma usada para efectuar pruebas y establecer valores - a diferentes materiales.
- AW - Allumoweld, representa a un alambre de acero recubierto de aluminio con el objeto de evitar la corrosión.
- BER - Bit Error Rate, expresa el porcentaje de errores, ocurridos al transmitir N bits de información.
- bit - mínima cantidad de información que en el sistema binario puede ser uno ó cero.
- campo eléctrico - región sometida a la influencia de una corriente eléctrica.
- carga de ruptura - expresión que indica el valor al cual un material se rompe.

carrera - ancho del tambor de un carrete y de la cual depende la capacidad del mismo.

catenaria - curva que se forma al suspender un cable entre dos puntos de apoyo.

claro - distancia horizontal medida entre dos puntos de apoyo que sostienen a un cable.

cuerpo opaco - es aquel que al no ser transparente evita el paso de la luz.

dB/Km - expresión que especifica las unidades de las pérdidas en la transmisión de señales, las cuales se deben a diferentes factores y se expresan como decibelios sobre kilómetro.

DCE - equipo de comunicación de datos en un sistema de comunicación.

decibelio - unidad de medida que sirve para representar la intensidad de los sonidos ó para comparar dos valores dados de potencia.

densidad - relación entre el paso de un cuerpo y el de un volumen igual de agua.

dispersión - descomposición de un haz luminoso en sus diferentes radiaciones.

distorsión - deformación de una onda.

DPE - equipo de procesamiento de datos en un sistema de comunicación.

DTE - equipo terminal de datos en un sistema de comunicación.

- espectro - conjunto de rayos procedentes de la descomposición de una luz compuesta.
- fidelidad - calidad en la reproducción de sonidos.
- flecha - distancia vertical medida desde la parte más alta del punto de apoyo del cable, hasta la parte -- más baja del mismo.
- fotón - partícula luminosa que representa un paquete de - energía.
- índice de refracción - relación óptica entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de re---fracción.
- interferencia - fenómeno físico que resulta de la supervisión de dos ó más ondas de la misma frecuencia y - amplitud.
- LED'S - Light Emitting Diode ó Diodo Emisor de Luz, usados como fuentes ópticas.
- longitud de onda ( $\lambda$ ) - distancia entre dos puntos que en un instante dado tienen el mismo estado de vibración.
- material extrínseco - cristal que ha sido dopado, es decir, se le agregaron átomos con impurezas.
- material intrínseco - cristal puro, es decir, aquel que no tiene átomos con impurezas.
- Mbits/seg. - un millón de bits por segundo, referido a la cantidad ó velocidad de información que puede transmitirse en un tiempo dado.

- N.A. - apertura numérica de un cable, la cual expresa la aceptación de los rayos de luz en una fibra óptica.
- NRZ - Non Return To Zero, código usado para transmitir información.
- onda - nombre de las líneas ó superficies concéntricas -- que se producen en una masa fluida que recibe determinado impulso en uno de sus puntos.
- onda portadora - es aquella onda con una frecuencia alta que permite, al modularse, transmitir señales en forma eficaz y a bajo costo.
- OPGW - Optical Ground Wire, expresión que denota a las fibras ópticas instalados en un hilo de guarda.
- paso de cableado - distancia rectamedida desde un punto a otro de una hélice formada al aplicar un alambre helicoidalmente sobre un núcleo
- pérdidas de cableado - exceso en la longitud de un cable por ir cableado ó enrollado en forma helicoidal, - en vez de ser longitudinal.
- pérdidas por la atenuación - referida a los dB/Km que pierden una señal al transmitirse entre dos puntos dados, que pueden ser un emisor y un detector óptico.
- RZ - Return to Zero, código usado para transmitir información.
- SNR - Signal Noise Relation ó Relación señal a ruido de un circuito electrónico.
- tambor - cilindro sobre el cual se enrolla un cable.
- telecomunicación - conjunto de medios para la comunicación a distancia.

TIR - Total Internal Reflection ó Reflexión Total Interna, referida a los rayos totalmente reflejados dentro del núcleo de la fibra.

transmitancia - relación de las cantidades complejas que representan, respectivamente, las magnitudes de salida y de entrada de un servosistema lineal.

**BIBLIOGRAFIA**

1. MOTOROLA  
Optoelectronic Device Data  
Motorola Inc.  
segunda Edición  
E.U.A.  
1983
  
2. VIQUEIRA LANDA, JACINTO  
Redes Eléctricas, Tomo I  
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.  
Segunda Edición, Primera Reimpresión  
México, D.F.  
1982
  
3. GROSS, CHARLES A.  
Análisis de Sistemas de Potencia  
Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V.  
Primera Edición  
México, D.F.  
1982
  
4. STEVENSON, WILLIAM D.  
Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia  
Mc Graw - Hill  
Segunda Edición  
México, D.F.  
1979

5. IEEE  
Fiber Optic Applications in Electrical Substations  
Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.  
Primera Edición  
Nueva York, E.U.A.  
1983.
  
6. IEEE  
Fiber Optic Applications in Electrical Utilities  
Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.  
Primera Edición  
Nueva York, E.U.A.  
1984
  
7. BOLETIN IIE, HERNANDEZ G, ALICIA Y SALAZAR P, ROSA E.  
Proyecto de Comunicaciones sobre Líneas de Alta Tensión  
División de Estudios de Ingeniería del Instituto de In-  
vestigaciones Eléctricas.  
México, D.F.  
Septiembre 1978
  
8. BOLETIN IIE, VARIOS AUTORES  
Optimización de Torres de Transmisión  
División de Estudios de Ingeniería del Instituto de In-  
vestigaciones Eléctricas  
México, D.F.  
Julio 1981
  
9. BOLETIN IIE, PINEDA, JAVIER Y TOVAR, JOSE.  
Enlace Experimental de Telecomunicaciones por Fibras --  
Ópticas.  
División de Estudios de Ingeniería del Instituto de In-  
vestigaciones Eléctricas.  
México, D.F.  
Septiembre/Octubre 1983

10. OHIRA, SAKARI; TANAKA, AKIRA; SATO, HARUFMI  
Development and Utilization of OPGW in Overhead ----  
Transmission Lines  
Hitachi Cable Review No. 2  
Japón  
Agosto 1983
  
11. TANAKA, AKIRA; TERADA, SHIGERU  
New Applications of AS Wire (Aluminium Clad Steel ---  
Wire)  
Hitachi Cable Review No. 1  
Japón  
Agosto 1982
  
12. SALMERON, MARIA JOSE  
Líneas de Transmisión, Guías de Onda y Fibras Ópticas  
Editorial Trillas  
México, D.F.  
1981
  
13. SHARMA-HALME-BUTUSOV  
Optical Fibers Systems and Their Components  
Editorial Springer  
Nueva York, E.U.A.  
1981
  
14. HEWLETT - PACKARD  
Optoelectronics Fiber - Optics Applications Manual  
Mc Graw Hill Book Company  
E.U.A.  
1981



15. GIECK, KURT  
Manual de Fórmulas Técnicas  
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.  
Doceava Edición  
México, D.F.  
1977
  
16. KAO, K.C. Y HOCKMAN, G.A.  
Dielectric Fiber Surface Waveguides for Optical -----  
Frequencies  
Proc I.E.E.  
Julio 1966
  
17. KAO, K.C.  
Optical Fiber Systems  
Mc Graw-Hill  
New York, U.S.A.  
1982
  
18. ASTM B-549, B-547, B-498, B-429 Y B-231  
American Society for Testing and Materials  
Tomos 6 y 7  
1982
  
19. WHITE, H.E.  
Física, Moderna Vol. I y II  
Montaner y Simón, S.A.  
Barcelona, España  
1979

20. WIDWINTER, V.E.  
Optical Fibers for Transmission  
John Wiley and Sons  
Nueva York, E.U.A.  
1979