



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Caracterización de pérdidas en  
líneas de comunicación de fibra  
óptica (propuesta sobre un  
experimento de laboratorio  
docente)**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico Electricista**

**P R E S E N T A**

Adriana Olivia Franco Camacho

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Sergei Khotiaintsev



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2003

*A Dios:*

*Por permitirme la culminación de mis  
estudios profesionales.*

*A mis Padres:*

*Por darme la vida, su invaluable  
confianza, apoyo y cariño.*

*A mis Hermanos:*

*Ernesto, Cristina, Maria Eugenia y  
Laura.*

*A mi Esposo:*

*Por su compañía y fortaleza.*

*A mis Maestros:*

*Por haberme formado en las aulas  
bajo su valiosa guía.*

# Í N D I C E

|                           | <b>Página</b> |
|---------------------------|---------------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>      |
| <b>JUSTIFICACIÓN.....</b> | <b>3</b>      |
| <b>OBJETIVOS.....</b>     | <b>4</b>      |

## C A P Í T U L O I

### **1. DESARROLLO ACTUAL DE TELECOMUNICACIONES.**

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN.....  | 5  |
| 1.1 Tipos de información.....                            | 5  |
| 1.2 Sistemas básicos de telecomunicaciones.....          | 7  |
| 1.3 Tipos comunes de sistemas de telecomunicaciones..... | 9  |
| 1.4 Normas técnicas .....                                | 9  |
| 1.5 Codificación y mensajes eléctricos .....             | 10 |
| 1.6 Transmisión analógica y digital.....                 | 10 |
| 1.7 Telegrafía.....                                      | 11 |
| 1.8 Telefonía.....                                       | 12 |
| 1.9 Sistemas de transmisión.....                         | 13 |
| 1.10 Circuitos de audio.....                             | 14 |
| 1.11 Transmisión sobre cable coaxial.....                | 16 |
| 1.12 Radio.....  | 18 |
| 1.13 Sistemas de satélite.....                           | 29 |
| Resumen.....   | 33 |

## CAPÍTULO II

### 2. LÍNEAS DE COMUNICACIONES EN FIBRA ÓPTICA.

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Historia de las comunicaciones por fibra óptica.....                            | 34 |
| 2.2  | Transmisiones por fibra óptica.....   | 37 |
| 2.3  | Principales características del cable de fibra óptica. ....                     | 37 |
| 2.4  | Estructura básica y clasificación de la fibra óptica.....                       | 41 |
| 2.5  | Teoría de propagación de la fibra óptica.....                                   | 44 |
| 2.6  | Características de transmisión en la fibra óptica. ....                         | 46 |
|      | 2.6.1 Pérdidas de transmisión en la fibra óptica. ....                          | 46 |
| 2.7  | Respuesta en frecuencia de banda base.....                                      | 48 |
| 2.8  | Características de transmisión en fibras de gran<br>longitud con empalmes. .... | 54 |
| 2.9  | Estructura de la fibra recubierta.....  | 57 |
| 2.10 | Diseño del cable de fibra óptica.....   | 58 |
| 2.11 | Fabricación del cable de fibra óptica. ....                                     | 61 |
| 2.12 | Fabricación de las fibras de sílice.....  | 62 |
| 2.13 | Trenzado de las fibras ópticas.....   | 66 |

### CAPÍTULO III

#### 3. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE LA ENERGÍA DE LA SEÑAL EN UNA FIBRA ÓPTICA.

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.1   | Parámetros importantes de una fibra óptica.                     |    |
| 3.1.1 | Conjunto de parámetros más importantes de una fibra óptica..... | 68 |
| 3.1.2 | Atenuación.....   | 68 |
| 3.1.3 | Longitud de onda de límite de corte.....                        | 69 |
| 3.1.4 | Diámetro de campo modal.....                                    | 70 |
| 3.1.5 | Dispersión temporal.....  | 70 |
| 3.2   | Medición de atenuación  |    |
| 3.2.1 | Método del corte.....   | 71 |
| 3.2.2 | Método de pérdidas de inserción.....                            | 72 |
| 3.2.3 | Método de retrodispersión.....                                  | 76 |

### CAPÍTULO IV

#### 4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA SOBRE EL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN DE LA SEÑAL EN UNA FIBRA ÓPTICA, UTILIZANDO EL MÉTODO DE CORTE.

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Elaboración de la estructura del sistema de medición de la atenuación de la señal de una fibra óptica..... | 84 |
|-----|--|----|

|     |  |           |
|-----|--|-----------|
| 4.2 | Elaboración de propuestas particulares sobre la implementación de algunos subsistemas y unidades del sistema de medición de la atenuación de la señal en una fibra óptica..... | 88        |
|     | <b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>   | <b>96</b> |
|     | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>97</b> |

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología en las últimas décadas, ha revolucionado todas las áreas de la actividad humana. Uno de los campos que se encuentra en acelerada evolución es el de las telecomunicaciones, basándose en los sistemas de transmisión óptica, con avances por demás significativos en los últimos años.

Tanto en Japón como en otros países, se han puesto en servicio numerosos sistemas de transmisión, utilizando cables de fibra óptica. Esto es debido a la alta tecnología en la fabricación de fibras ópticas y de cables, al desarrollo de los procedimientos para su evaluación, al mejoramiento de su calidad y al establecimiento de normas de diseño de tales elementos.

La longitud total de las líneas en fibras ópticas en operación es mayor que las de las líneas tradicionales de conductores de cobre y de cables coaxiales. Sus ventajas principales son las bajas pérdidas de energía de la señal óptica y su gran ancho de banda. Por estas razones un sistema de fibra óptica permite transmitir señales a través de grandes distancias y tiene la capacidad de transmitir más información por unidad de tiempo, que cualquier otro tipo de sistemas de comunicación. Es así que la fibra óptica aparece como el elemento principal de una línea o red de comunicación óptica, aparte de muchos otros elementos pasivos que la complementan.

Sin embargo, no obstante todas las ventajas señaladas, aun persisten esas bajas pérdidas en la transmisión de la señal óptica por muy variadas situaciones. Su estudio nos permite conocer sus características, y mediante la aplicación de la metodología más adecuada optimizar los sistemas de transmisión.



## JUSTIFICACIÓN

La importancia y el auge alcanzado por los sistemas de transmisión de señales, a base de redes de fibras ópticas, plantea la necesidad de mejorar su tecnología resolviendo los problemas de pérdida de energía, y lograr así su máximo rendimiento.

Partiendo de tal premisa, se hace una recopilación de los antecedentes de las telecomunicaciones y su desarrollo actual, al igual que de las líneas de comunicaciones a base de fibra óptica, y se presentan diversos métodos para la medición de pérdidas de la energía de la señal en una fibra óptica .

Como corolario se hace una propuesta para el sistema de medición de la atenuación de la señal en una fibra óptica, utilizando el método de corte.

## **OBJETIVOS**

Enriquecer la investigación académica valorando el desarrollo actual de las telecomunicaciones, partiendo de los tipos de información, los diferentes sistemas básicos de telecomunicaciones, los tipos más comunes que existen, pasando por telegrafía, telefonía, circuitos de audio, transmisión sobre cable coaxial, radio y sistemas de satélites.

Evaluación de las líneas de comunicaciones por fibra óptica, haciendo una reseña de los antecedentes históricos, sus principales características de transmisión observando las causas que propician pérdida de la señal, su estructura básica, su clasificación, concluyendo con las formas de fabricación.

Señalar los métodos para la medición de pérdidas de la energía de la señal en una fibra óptica.

Desarrollar una propuesta sobre el sistema de medición de la atenuación de la señal en una fibra óptica, utilizando el método de corte y mediante la elaboración de soluciones particulares.

# **CAPÍTULO I**

## **DESARROLLO ACTUAL DE LAS TELECOMUNICACIONES**

### **INTRODUCCIÓN**

La información es un conjunto de datos que representan ideas mediante las cuales se incrementa nuestra conciencia, inteligencia o conocimiento. Desde el punto de vista de telecomunicaciones, información es un concepto perfectamente definido. Por otro lado, comunicación se define como la impartición, envío o intercambio de información entre diferentes entidades. Se puede realizar mediante lenguaje, imágenes, instrucción, movimiento, olor, etc., o puede ser simplemente una mueca. Telecomunicaciones significa la transmisión a distancia de información mediante procedimientos electromagnéticos.

La forma más simple de flujo de información puede ser directamente de una persona a otra, mediante palabras o señas visuales. Otras alternativas son el envío de información sobre papel o en forma eléctrica. La ventaja de cualquiera de estos dos últimos métodos es que la información también se puede almacenar para referencia futura.

Algunos tipos de comunicación son combinaciones de los tres métodos básicos. Por ejemplo, las modernas máquinas facsímil son capaces de transmitir imágenes de documentos en papel sobre la red telefónica y reproducirlos en un lugar distante.

#### **1.1. Tipos de información.**

Dentro del contexto específico de telecomunicaciones, la información puede ser una página de texto escrito, una conversación, una imagen de televisión. etc. La

información comúnmente requiere de la conversión a forma eléctrica (señal), para que sea enviada por medios de telecomunicación. Pero existen muchos tipos diferentes de información, de modo que cabría la pregunta de si se pueden tratar todos de idéntica manera. La respuesta a esta interrogante es "no", porque cada tipo de información impone demandas ligeramente diferentes al sistema.

La información que se envía sobre los sistemas de telecomunicaciones, normalmente se clasifica como información **analógica** y de **datos**. La señal analógica es un tipo de onda eléctrica cuya forma es directamente análoga a la información que representa, (por ejemplo, voz o una imagen de televisión). Datos, por otro lado, es el término que se emplea para describir información en la forma de texto y números. Los elementos que la forman comúnmente se conocen como **caracteres alfanuméricos**.

Los dos diferentes tipos de información analógica y de datos requieren tratamiento diferente. Por ejemplo, cuando se conversa con alguien, se espera que las respuestas lleguen inmediatamente después de nuestra propia voz, pero cuando enviamos una carta esperamos la respuesta en varios días. La analogía es directa con las telecomunicaciones; esto es, la representación eléctrica de la conversación debe permitir que el oyente responda inmediatamente. Pero en el caso de la comunicación de datos, existe un tiempo ligeramente mayor, pues una computadora está preparada para aceptar tiempos de respuesta de 1 a 2 segundos. Un humano encontraría esta magnitud de retardo intolerable en la conversación cotidiana. Otra diferencia entre las representaciones eléctricas diseñadas para diferentes aplicaciones, sería la velocidad con la cual la información se puede transferir. Un circuito de voz requiere más ancho de banda para transportar los diferentes tonos de

voz, de lo que necesita un circuito telegráfico simple para transportar la misma información en forma de texto. Posteriormente se verán los diferentes métodos de representación eléctrica y estándares técnicos que se emplean.

## **1.2. Sistema básico de telecomunicaciones.**

Para la transferencia efectiva de información entre dos puntos, deben existir cuatro componentes esenciales:

- I. Un dispositivo de transmisión
- II. Un mecanismo de transporte
- III. Un dispositivo de recepción
- IV. Que el transmisor envíe sólo la información que sea compatible para el receptor.

Los cuatro componentes anteriores juntos forman un sistema de telecomunicaciones.

En el caso de dos personas que hablan entre sí, el dispositivo de transmisión es la boca, el mecanismo de transporte es el aire sobre el que el sonido se desplaza, y el dispositivo de recepción es el oído de la otra persona. Considerando que ambas personas hablan el mismo idioma, el cuarto requisito queda también satisfecho, y la conversación se puede realizar. Pero si el emisor habla solo inglés y el oyente sólo francés, entonces, a pesar de la disponibilidad de los componentes físicos, (boca, aire y oído), la comunicación es inefectiva debido a la incompatibilidad de la información. La codificación y el método de transferencia de información sobre el mecanismo de transporte se conoce como **protocolo**. En el caso de una comunicación verbal, el protocolo sería el idioma francés o el inglés: el hecho de que el emisor hable sólo inglés y el oyente sólo francés, es un ejemplo de

incompatibilidad de protocolo. El protocolo también define el procedimiento que se va a emplear. Un ejemplo de la parte de procedimientos del protocolo, es el empleo de la palabra **cambio** para indicar el fin de los radiomensajes. En este caso, el protocolo apronta la respuesta y evita que ambas partes hablen a la vez. La parte más pesada del diseño de un sistema de telecomunicaciones, a menudo es la necesidad de asegurar la compatibilidad de protocolo. En algunos casos, esta necesita el suministro de dispositivos de interoperación. En nuestro ejemplo, este dispositivo puede ser un traductor de inglés a francés.

Los elementos físicos de un sistema simple de telecomunicaciones, deben complementarse con el empleo de un protocolo compatible entre el emisor y el receptor. La comunicación puede ser en un solo sentido, (**operación simplex**), que tiene aplicación en algunas formas de comunicación, sin embargo en otros muchos casos de comunicación, la operación bidireccional o **duplex** es necesaria. Para este tipo de operación, se debe proveer un transmisor y un receptor en ambos extremos de la conexión. Por ejemplo. un microteléfono contiene un micrófono (transmisor) y un audífono (receptor).

El mecanismo de transporte, puede ser alguno de toda una gama de medios diferentes que van desde el aire, sobre el cual se desplazan las ondas acústicas, hasta la tecnología más nueva de fibra óptica, a través de la cual se transmiten pulsos de luz. Además, el mecanismo de transporte puede o no incluir un elemento de conmutación.

La mayoría de los mecanismos de transporte, requieren codificar la información o los datos en una forma de señal apropiada para su envío sobre los medios eléctricos de transmisión, de tal manera que los tipos comunes de

Información, (voz, TV, telex, datos de computadora, facsímil, etc.), se convierten en una señal transmisible que se transporta ya sea en la forma analógica o digital.

### **1.3. Tipos comunes de sistemas de telecomunicaciones.**

Con el objeto de satisfacer diferentes necesidades de comunicación, con el tiempo se han desarrollado diferentes tipos de sistema de telecomunicaciones. En orden cronológico éstos son:

- Telegrafía
- Telefonía
- Telex
- Redes de datos empleando ya sea **conmutación de circuitos o conmutación de paquetes.**
- Redes de computadora locales y de área amplia (LANs y WANs).
- Redes integradas de voz y datos.

### **1.4. Normas técnicas.**

Con el objetivo de fomentar mayor compatibilidad entre los diferentes sistemas de telecomunicaciones, en diferentes partes del mundo se encuentran organismos dedicados a la tarea de emitir normas. Dos de los organismos más importantes y que ejercen mayor influencia son:

- La Organización Internacional de Normas (International Organization for Standarization)
- La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y específicamente el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicación (CCIR).

- Las normas y recomendaciones que estos dos organismos crean, se emplean comúnmente en las telecomunicaciones.

### **1.5. Codificación y mensajes eléctricos.**

Para que la información se pueda transportar adecuadamente sobre las redes de telecomunicaciones, primero se debe codificar en forma eléctrica, es decir, como mensaje eléctrico (señal). Únicamente tales señales se pueden enviar sobre los conductores y centrales que forman el mecanismo de transporte de las redes de telecomunicaciones. Así, se define señal como la manifestación eléctrica de la información.

A través de los años, se han desarrollado diferentes métodos para codificar los diversos tipos de información, de los cuales se hace un estudio, empezando por el más sencillo de todos, el enlace básico de transmisión eléctrica.

### **1.6. Transmisión analógica y digital.**

El mecanismo de transporte más simple que se emplea en telecomunicaciones, es el par de conductores eléctricos. Este permite el envío de una corriente eléctrica de señal desde el transmisor en un extremo del par, hasta el receptor en el otro extremo.

Existen dos métodos básicos de codificación de información que se pueden utilizar para transmitir en forma eléctrica dicha información. Estos son: la codificación y transmisión analógica y la codificación y transmisión digital.

La codificación analógica implica la creación de una forma de onda eléctrica, (señal), análoga a la forma de onda de la información original (ejemplo: un patrón



de onda de voz). De esta manera la señal es de forma similar a la voz, o a la forma de onda de la información que representa. Las líneas de transmisión analógicas se emplean para enviar señales con codificación analógica, e históricamente, han predominado en los enlaces de las redes de telecomunicaciones del mundo. Las **centrales analógicas** han suministrado las interconexiones nodales entre enlaces de este tipo.

En la codificación digital la información se convierte en una serie de pulsos eléctricos binarios, que pueden asumir alguno de solo dos valores posibles de amplitud (por ejemplo 0 volts o A volts). Se dice que la información se envía como una serie de dígitos y de aquí el término de transmisión digital. Esta técnica se ha convertido en el principal método de transmisión de telecomunicaciones. Esto se debe a los beneficios significativos que ofrece la transmisión digital, tanto en términos de funcionamiento como de costo.

La mayoría de los fabricantes producen equipo capaz de soportar diferentes medios de transmisión y tipos de codificación. La elección del medio y sistema de codificación que se deben emplear, es decisión del diseñador de redes, quien necesita considerar los costos relativos y la facilidad con la cual cualquier nuevo tipo de **sistema de línea** se podría incorporar en la red existente.

El equipo de conmutación, (centrales), también se clasifica en **analógico y digital**. Un conmutador es, después de todo, solamente una forma especializada y muy flexible de equipo de transmisión.

## **1.7. Telegrafía**

La telegrafía fue el primer método común de transmisión que por cierto fue digital. Se inició a principios del siglo XIX, y fue Samuel Morse, el precursor de las

comunicaciones modernas. Inventor del código Morse, desarrolló un sistema telegráfico práctico en 1835. En 1837 se estableció un sistema desde la estación de ferrocarril Euston en Londres, hasta Camden, a una milla de distancia. En 1865, el código Morse se aceptó como estándar mundial en la primera Convención telegráfica internacional, que después dió origen a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). El interés público por la telegrafía creció rápidamente hasta alrededor de 1880, cuando los teléfonos pudieron estar más ampliamente disponibles. La telegrafía constituyó también la base del primer servicio de telegramas.

El siguiente paso importante, fue automatizar la telegrafía mediante las redes telex, con lo que el código Morse fue superado por el código Murray, otro código digital diseñado especialmente para el trabajo automático.

Tanto en las redes telegráficas, como en las de telex, la transmisión secuencial en dos direcciones sobre un solo par de hilos, es posible, simplemente suministrando un dispositivo capaz de las dos funciones de transmisión y recepción en ambos extremos de la línea.

## **1.8. Telefonía.**

Los principios de la telefonía se remontan al año 1875, cuando Alexander Graham Bell inventó el teléfono. En términos del volumen total de información que transporta, sin duda la telefonía sigue siendo el método más importante de las telecomunicaciones de larga distancia.

La telefonía es la transmisión de sonido, particularmente la voz, hacia un lugar distante. La telefonía se logra mediante la conversión de las ondas de sonido de la

voz del emisor, en una onda eléctrica equivalente. Consideremos las características del sonido para entender cómo se lleva a cabo esta conversión.

El sonido no es más que vibraciones del aire que nos rodea, causadas por bolsas de alta o baja presión de aire, que han sido generadas por alguna forma de vibración mecánica, por ejemplo un objeto golpeando a otro, o la vibración de las cuerdas bucales humanas durante la emisión de voz. Las ondas de sonido en el aire que nos rodea, provocan que los objetos vecinos vibren en simpatía. El oído humano detecta el sonido mediante el uso de un diafragma muy sensitivo, que vibra en sincronía con el sonido que lo impacta. El **timbre** de un sonido, (qué tan alto o bajo suena), depende de la frecuencia de vibración del sonido.

### **1.9. Sistemas de transmisión.**

La teoría básica de transmisión por línea, junto con los principios de la transmisión analógica y digital sobre pares de conductores, es apropiada para el envío sobre cortas distancias de un pequeño número de circuitos, no siempre es práctico o económico emplear una gran cantidad de **pares físicos** entre centrales de modo, por lo que se ha recurrido a MDF y MDT, con el objeto de reducir el número de pares que se necesitan para transportar un gran número de circuitos de largo alcance entre puntos terminales comunes. Existen, por supuesto, otros medios de transmisión que se deben considerar, algunos de ellos mucho mejor adaptados a aplicaciones particulares distintas a las del par eléctrico. Se incluyen: el cable coaxial, el radio, satélites y fibras ópticas. Una vez que se dominan las características principales de cada uno de estos medios de transmisión, es posible decidir cuál es más adecuado para la aplicación particular.

### **1.10. Circuitos de audio.**

Los sistemas de transmisión de 2 ó 4, (que emplean respectivamente, uno o dos pares físicos de hilos de cobre o aluminio), equipados con amplificadores e igualadores, se conocen justamente como **circuitos de audio**. En la práctica, los conductores se tuercen dentro del cable y de ahí los términos de **pares torcidos** y **cables de pares torcidos**. El título de circuito de audio, se debe a que las frecuencias de las señales que manejan, están en el rango de audio; las señales no se procesan de manera alguna, no se modulan ni se multiplexan.

Los circuitos de audio se pueden emplear para transportar cualquiera de una gran gama de anchos de banda, si bien que en general entre mayor es el ancho de banda a transportar, menor es el alcance máximo del circuito, pues las propiedades eléctricas de la línea tienden a estorbar. Se sabe que las señales de alta frecuencia se transportan sólo por la superficie exterior de los conductores de cobre, (efecto Skin), y esto hace que las señales de alta frecuencia sean vulnerables a las interferencias de campos eléctricos y magnéticos que emanan de los conductores adyacentes.

Los circuitos de audio sin amplificación, se emplean comúnmente para suministrar circuitos troncales de alcance relativamente corto, con un ancho de banda de 4 kHz entre centrales para un máximo de 20 km aproximadamente, pudiéndose emplear la amplificación para extender este rango. Ejemplo típico de aplicación de un circuito de audio, es para conectar una central local con la central de LD más cercana. Aún así, arriba de 15 km, se emplean amplificadores y la economía tiende a favorecer a otros medios de transmisión. Como ejemplo, un par de conductores sin amplificación de 0.63 mm de diámetro, tiene la pérdida de

inserción, (pérdida de la línea que se debe agregar a las pérdidas del circuito), de 3 dB en 7 km de longitud. El alcance de transmisión para la voz se incrementa a 33 km empleado un amplificador, pero este límite queda invalidado por las necesidades de calidad de la línea del sistema de señalización.

Como ya se explicó, la cantidad de degradación de la señal, (atenuación y distorsión), en medios de transmisión a base de par torcido, se puede reducir pupinizando el cable, o simplemente, aumentando el diámetro (calibre), de los conductores mismos. Conductores más gruesos, provocan menor atenuación de señal debido a que presentan menor resistencia. Sin embargo, la economía relativa de medios alternativos de transmisión, hace que el empleo de calibres muy pequeños, (mayores diámetros), de pares torcidos, sea antieconómico, sobre distancias arriba de 20 Km. A estos rangos, los conductores de un circuito no amplificado de audio necesitan ser de 1 mm de diámetro, y como la cantidad de material conductor que se requiere, (cobre o aluminio), es proporcional al cuadrado del diámetro, el costo se eleva rápidamente a medida que el diámetro del cable aumenta. Sobre un panorama más alentador, lo inverso también se aplica, de modo que a distancias más cortas, los cables más delgados son económicamente favorables. De todas formas, el diseñador de redes dispone de amplia información que le ayuda a elegir el conductor correcto, (cobre, aluminio, etc.), y el calibre apropiado para reducir los costos, dando a la vez los funcionamientos de transmisión que se requieren.

Debido a que son susceptibles a la interferencia electromagnética externa, los circuitos de audio normalmente no son apropiados para sistemas de ancho de banda muy grandes, incluyendo los sistemas MDF. Los circuitos de audio más comunes se

encuentran en redes de pequeña escala y dentro del área local de las centrales telefónicas. Cierta cantidad de pares torcidos normalmente se agrupan dentro de cables de gran capacidad. Un cable puede variar en tamaño desde unos 3 mm de diámetro, hasta 80 mm, conteniendo desde uno hasta varios miles de pares. Así, partiendo de una central local de 10,000 líneas, un pequeño número (10-20), de **cables principales** de varios cientos o miles de pares, puede correr por las calles a lo largo de ductos hasta gabinetes externos sobre las banquetas, en donde se emplea una estructura de interconexión para extender los pares hacia delante en una estructura de estrella, sobre cables más delgados (25 ó 50 pares). Finalmente, en el **punto de distribución**, los pares individuales se pueden conectar dentro de una caja de distribución, (en la parte superior de un poste), y partir de aquí hacia el domicilio particular del abonado.

### **1.11. Transmisión sobre Cable Coaxial.**

El problema principal en el par torcido, es la distorsión de señal provocada por el **efecto Skin**. La interferencia se puede manifestar como ruido sobre la línea o, en casos extremos, se puede inducir desde pares adyacentes, una señal de voz más fuerte o cualquier otra señal. La probabilidad de tal interferencia se incrementa, cuando se transportan señales con anchos de banda más grandes (incluyendo MDF). Se dispone de dos alternativas para reducir la interferencia. La primera es blindar el cable con una hoja ligera de metal, normalmente enrollada dentro de la cubierta del cable (cable blindado). El cable blindado, también incluye blindajes entre conductores dentro del cable, para aislar los pares de recepción y transmisión. El segundo tipo de cable que elimina la interferencia electromagnética de este tipo, es el cable coaxial. Su construcción es tal, que la mayor parte de la señal se

transporta mediante un campo electromagnético cercano al centro del cable. El cable coaxial, constituyó el "caballo de batalla" de los sistemas de transmisión MDF analógicos de banda ancha y primeros sistemas digitales. Últimamente, la fibra óptica lo está suplantando para las nuevas líneas digitales.

En lugar de un par torcido, el cable coaxial consiste de 2 conductores concéntricos, comúnmente de aluminio o cobre. El conductor central está separado del conductor cilíndrico externo por una capa cilíndrica de aislante.

El conductor externo es una hoja o malla metálica, enrollada espiralmente alrededor de la capa aisladora, y arriba de ésta se encuentra una capa de protección para asegurar el aislamiento externo y la protección física del cable.

Un solo cable coaxial, es equivalente a un solo par de conductores torcidos. Para lograr el equivalente de la transmisión a 4 hilos, se deben emplear dos cables coaxiales; por uno se transmite, y por el otro se recibe.

Los cables coaxiales funcionan de manera muy semejante a los circuitos de par torcido, pero existen algunas diferencias importantes en el funcionamiento. A diferencia de los circuitos de audio de par torcido, los circuitos de cable coaxial son **desbalanceados**. Esto significa que los dos conductores del cable coaxial no actúan igualmente en el envío de las señales. En un circuito balanceado, como el par torcido, en donde la señal se transporta mediante la corriente eléctrica de los dos conductores que pasan en direcciones opuestas, las corrientes generan campos electromagnéticos iguales pero opuestos alrededor de ellos que tienden a cancelarse entre sí. Por el contrario, la señal de un cable coaxial se transporta principalmente mediante el campo electromagnético que rodea a los conductores interno y externo, que es inducido en su mayor parte por el conductor central. El conductor externo,

algunas veces llamado blindaje, se opera comúnmente a voltaje de tierra, evitando que el campo magnético se radíe hacia fuera de la cubierta del cable. Es decir, la señal se protege de la interferencia en buena medida.

Desafortunadamente, la cantidad total de atenuación de señal es mayor en los circuitos desbalanceados que en los balanceados, y esto se tiene que compensar con el uso de amplificadores. Por otro lado, a diferencia de los circuitos de pares torcidos que son propensos a perder el balance como resultado de la humedad o daño, los cables coaxiales son más estables y sufren menos de la atenuación variable y de reflexiones extrañas de señal que algunas veces afectan a los pares torcidos. Los cables coaxiales son más confiables en servicio, más fáciles de instalar y requieren menor mantenimiento. Además, debido a su insensibilidad a la interferencia electromagnética, se comportan mejor que los pares torcidos cuando la ruta de cable pasa cerca de objetos metálicos u otros cables eléctricos.

### **1.12. Radio.**

Heinrich Hertz, en 1887, fue capaz de producir las primeras ondas de radio. Las ondas de radio, como la electricidad y la luz, son formas de radiación electromagnética; la energía se envía mediante **ondas** campos magnético y eléctrico. En un conductor, estas ondas se inducen y se guían mediante una corriente eléctrica que pasa a lo largo de un conductor eléctrico, pero ésta no es la única forma de propagar las ondas electromagnéticas (EM). Empleando una señal eléctrica muy potente como fuente de transmisión, una onda EM se puede propagar muy lejos a través del aire. Este es el principio del radio. Las ondas de radio se producen en los transmisores, que consisten de una fuente de ondas de radio conectada a alguna forma de antena, como por ejemplo:



- Antena de baja frecuencia (aérea)
- Antena o mástil de AF (alta frecuencia), MAF (muy alta frecuencia) o UAF (ultra alta frecuencia)
- Antena de plato de microondas
- Antena de dispersión troposférica
- Antena de satélite

El radio es una manera particularmente efectiva de comunicación, entre localidades remotas y sobre regiones difíciles, en donde el tendido de cable y el mantenimiento no es posible, o es particularmente costoso.

Una forma de comunicar información mediante ondas de radio, es codificado, o más correctamente **modulando** una portadora de alta frecuencia antes de la transmisión. La técnica de modulación de radio es muy similar a la que se emplea en MDF, utilizando la operación de banda lateral única (BLU), si bien, que la portadora normalmente se suprime. La característica distintiva de una señal portadora de radio, es su alta frecuencia en relación con el ancho de banda de las frecuencias de la señal de información. La frecuencia de la portadora tiene que ser alta, para que se pueda propagar como onda de radio.

La modulación de la portadora puede seguir un régimen analógico o digital. La modulación analógica se lleva a cabo de manera similar a la del MDF. La modulación digital, puede ser la modulación de *encendido/apagado* de la señal portadora, (es decir, prendiendo o apagando la portadora), o mediante otros métodos tales como **modulación por desviación de frecuencia** (MDFr), **modulación por desviación de fase** (MDFa), o **modulación de amplitud de cuadratura** (MAC).

Después de la modulación, la señal modulada se amplifica y se aplica a la antena. La amplificación refuerza la intensidad de la señal suficientemente, para que la antena convierta la energía de la corriente eléctrica, en una onda de radio suficientemente potente.

### **Propagación de Ondas de Radio.**

Cuando las ondas de radio se transmiten desde un punto, se dispersan y propagan como frentes de onda esféricos. Los frentes viajan en una dirección perpendicular al frente de onda.

Las ondas de radio y de luz son formas de radiación electromagnética, y presentan propiedades similares. Justo como un rayo de luz se puede reflejar, refractar (doblamiento ligero), y difractar (ligera inclinación alrededor de obstáculos), también así las ondas de radio.

Un sistema de transmisión de radio, normalmente se diseña para aprovechar alguno de los siguientes modos:

- Propagación por **línea de vista**.
- Propagación por **onda de tierra** (difracción).
- Propagación por **dispersión troposférica** (reflexión y refracción).
- Propagación por **onda de cielo** (refracción).

Un sistema de transmisión por línea de vista, como microondas, se apoya en el hecho de que las ondas viajan en línea recta. Este es quizá el tipo más simple de sistema, siempre que el receptor esté **dentro de la línea de vista** del transmisor, entonces la propagación por línea de vista (LV) es posible. El alcance de un sistema de LV, está limitado por el efecto de la curvatura de la Tierra. Los sistemas de radio

también pueden tener alcance más allá del horizonte, utilizando uno de los otros tres efectos de radio propagación.

Las ondas de Tierra, (o de superficie), tienen buen alcance, dependiendo de su frecuencia. Se propagan mediante difracción utilizando la Tierra como **guía de onda**. Las señales de radio de baja frecuencia son las mejor adaptadas para la propagación por onda de tierra, porque la cantidad de doblamiento, (más correctamente **difracción**), está relacionada con la longitud de onda de radio. Entre más larga es la longitud de onda, mayor es el efecto de difracción. Por lo tanto, entre menor es la frecuencia, mayor es el doblamiento. La segunda forma de transmisión de radio sobre el horizonte, es mediante la dispersión **troposférica**. Ésta es una forma de reflexión de ondas de radio. Ocurre en una capa de la atmósfera de la Tierra llamada **troposfera**, y trabaja mejor en ondas de radio de ultra alta frecuencia (UAF).

### **Antenas de Radio.**

Cada sistema individual de radio debe desempeñar tareas ligeramente distintas. Las cualidades que distinguen a los sistemas de radio son:

- Su alcance
- La potencia de señal que se recibe
- Su direccionalidad (e.d. si la señal que se transmite está concentrada en una dirección particular o no)

Estas cualidades quedan determinadas por el modo de propagación, para el cual se diseña el sistema, (e.d. de onda de tierra, dispersión troposférica, línea de vista, onda de cielo, etc.), por la frecuencia de la portadora de radio, por la potencia del sistema y, muy particularmente, por el arreglo de la antes transmisora y

receptora. El diseño de la antena tiene un efecto significativo en el alcance de los sistemas de radio, la direccionalidad y la potencia de la señal.

La antena de radio más simple, se conoce como **dipolo**. Consiste de un conductor recto metálico. Un ejemplo es la antena de FM de la radio de casa para recibir señales de radio de MAF. Otro ejemplo de un dipolo aéreo, es el mástil de radio. Éste puede tener una altura de algunos cientos de metros y consiste en un enorme dipolo.

Las cualidades de las antenas dipolo, las hacen apropiadas para la radio difusión comercial (omnidireccional), tanto para transmitir como para recibir señales de radio. Una antena dipolo radia una señal de igual intensidad en todas (omni) direcciones, y una antena receptora puede captar señales igualmente bien de todas direcciones. En consecuencia, los dipolos aéreos son los que se usan para transmisiones de radio, difusión de una estación transmisora, hacia muchas estaciones receptoras. Las antenas dipolo también se usan para la **transmisión de punto a punto**, cuando la ubicación del receptor o del transmisor se desconoce, como en el caso del radio móvil o barcos en el mar.

La desventaja de las antenas receptoras omnidireccionales, es su susceptibilidad a la radio interferencia provenientes de fuentes indeseadas. Las antenas de transmisión omnidireccional también tienen la desventaja de gastar mucha potencia, transmitiendo sus ondas de radio en todas las direcciones concebibles, pues sólo un pequeño número de puntos dentro de toda el área de cobertura, captan una fracción reducida de la potencia de señal; el resto se pierde. Por esta razón, algunas antenas se diseñan especialmente para trabajar en forma direccional. Un ejemplo de esto, es la antena con la forma de **plato** que se emplea

para sistemas de microondas, de satélite y de dispersión troposférica. Las antenas de plato trabajan enfocando las ondas de radio que transmiten en una dirección particular.

Otro tipo de antena es el que se conoce como **arreglo de antena**. Se trata de un arreglo de 16 metros de altura, cuyos elementos son los conductores desnudos que se ven, colgados desde el tope principal y arreglados en forma regular y rectangular. El patrón de elementos repetidos hace que la antena sea altamente direccional y elimine todas las señales con excepción de las que llegan en la dirección deseada.

Empleando una antena direccional en lugar de la omnidireccional, el alcance del sistema de radio, así como la potencia de la señal que se transmite sobre, o se recibe desde una dirección dada, se pueden controlar deliberadamente.

Las antenas direccionales son ideales para los enlaces de radio de punto a punto; la potencia total que se necesita para la transmisión se reduce, y la señal que se recibe padece de menos interferencia.

Los lóbulos de una antena, muestran la eficacia de transmisión y de recepción de la antena en las diferentes orientaciones direccionales. La longitud del lóbulo, es proporcional a la intensidad relativa de la señal de la onda de radio que transmite la antena en esa dirección particular. Por lo tanto, el círculo en el diagrama del óbulo de la antena omnidireccional, representa una intensidad de señal igual que se transmite en todas direcciones. Compárese ésta, con la antena direccional que presenta un lóbulo muy intenso en una dirección particular, y cierto número de otros mucho más pequeños. Esta clase de patrones de lóbulo, (o de radiación), es típico de muchos tipos de antenas direccionales.

Cualquier antena se puede emplear tanto para transmitir como para recibir y presenta el mismo patrón de radiación cuando se emplea para cualquiera de los propósitos. El patrón de radiación de una antena ejemplifica la direccionalidad de ella. En el lado de transmisión, hemos visto que el patrón de radiación muestra la intensidad relativa de señal que se transmite en diferentes direcciones. En el modo de recepción, el patrón ilustra la efectividad relativa de la antena para captar las ondas de radio provenientes de fuentes en las diferentes direcciones. Como ya se ha dicho, una antena receptora direccional, también ayuda a reducir la probabilidad de interferencia de otras fuentes de radio.

En cada extremo de cualquier enlace de radio se necesita una antena, pero ambas antenas no necesitan ser iguales. Por ejemplo, la antena transmisora puede ser un mástil de radiodifusión omnidireccional y de alta potencia, mientras que la antena receptora puede ser altamente direccional y quizá relativamente pequeña y barata, como sería el caso de la radiodifusión de TV, mientras que para el radio de barcos es difícil mantener las antenas direccionales correctamente orientadas, por lo cual la antena omnidireccional será la solución más económica.

### **Sistemas de Radio por Onda de Tierra.**

Los sistemas de radio por onda de tierra tienen buen alcance cuando emplean ondas de radio de relativamente baja frecuencia, (en este contexto, baja frecuencia es el rango de 50 kHz a 2 MHz). El radio de onda de superficie se emplea típicamente para transmisiones de radiodifusión, particularmente para sistemas de estaciones de radio públicas, radio-marítimas y de radio navegación. Las antenas de radio de onda de tierra de radiodifusión, comúnmente son mástiles de radio muy altos (varias decenas de metros de altura).

Las antenas de radio transmisión de radiodifusión generalmente combinan transmisores de alta potencia con un patrón omnidireccional de radiación. La alta potencia permite que los receptores domésticos sean relativamente sencillos y, por lo tanto, económicos. El patrón omnidireccional les permite transmitir sobre un área amplia.

### **Radio de Alta Frecuencia (AF).**

Las ondas de radio en la banda de frecuencias de 3-30 MHz, se propagan sobre mayores distancias en el modo **onda de cielo** que como lo hacen en la forma de **onda terrestre**. Para la propagación por onda de cielo, se utiliza una antena direccional para transmitir una onda de radio con un ángulo específico hacia el horizonte. El ángulo no debe estar muy cercano a la vertical a modo de impedir el escape de onda. La señal se transmite vía la ionósfera de la Tierra (región de aproximadamente 200-300 km sobre la superficie de la Tierra). Las capas de la ionósfera que tienen diferentes propiedades físicas hacen que la señal se refracte y sea eventualmente reflejada de regreso hacia la superficie de la Tierra . Desafortunadamente, el radio de onda de cielo de alta frecuencia es muy sensitivo a las condiciones de tiempo de la ionósfera. La hora del día y los ciclos de las manchas solares pueden interrumpir el servicio, dando lugar a desvanecimiento e interferencia. Sin embargo, el radio de alta frecuencia que emplea ondas de cielo fue uno de los primeros métodos de transmisión que se emplearon para el servicio telefónico internacional. En 1927, se puso en operación el primer servicio telefónico comercial entre Inglaterra y USA, muchos años antes de que se instalara el primer cable telefónico transatlántico en 1956.

## **Radio de Muy Alta Frecuencia (MAF) y de Ultra Alta Frecuencia (UAF).**

A frecuencias arriba de 30 MHz, ni la propagación por onda de cielo ni la propagación por onda de Tierra sobre el horizonte son posibles. Por esta razón, el espectro de MAF y UAF se emplean principalmente para los sistemas de radiotransmisión sobre el horizonte, pero sólo si las antenas se elevan lo suficientemente para superar los **efectos eléctricos de Tierra** de la superficie terrestre.

Los sistemas de radio de MAF y UAF que se hacen cada vez más comunes como base de un gran número de aplicaciones son:

- Estaciones locales de radio
- Radio de banda civil (CB)
- Radio celular (teléfonos móviles)
- Radio búsqueda.

La ventaja del radio de MAF y UAF es que permite el empleo de antenas mucho más pequeñas. Gracias a este radio se han hecho posible los aparatos portátiles de comunicaciones móviles de amplio alcance, algunos de los cuales poseen antenas de solo algunos centímetros de longitud. Un inconveniente es el alcance restringido de los sistemas de MAF y UAF, si bien que esto se ha tornado en ventaja en los sistemas de radio telefonía celular, en donde se emplean varios transmisores cubriendo cada uno una pequeña área celular. Cada célula ocupa determinada banda del espectro de radio para establecer llamadas telefónicas con estaciones móviles dentro de la célula. El hecho de que el alcance de radio sea corto, también significa que las células no adyacentes pueden **reutilizar** el mismo



espectro de radio sin posibilidad de interferencia, de modo que se puede conseguir una explotación muy grande del espectro de radio.

### **Radio de Microondas.**

Microondas (MO) es el nombre que se le da a las ondas de radio cuya frecuencia se encuentra arriba de los 1000 Mhz (1GHz) y cuyas longitudes de onda son de unos cuantos centímetros (por eso el prefijo **micro**). Los sistemas de MO comúnmente se emplean como sistemas de transmisión de alta capacidad de punto a punto en las redes de telecomunicaciones, por ejemplo: los enlaces troncales de alta capacidad entre ciudades de la red telefónica o, a menor escala (empleando antenas más pequeñas) entre oficinas de una compañía. La alta frecuencia y la longitud corta de onda del radio de MO permite la construcción de sistemas de radio de alta capacidad con el empleo de antenas relativamente pequeñas pero altamente direccionales. Este menor tamaño genera beneficios en términos de costo, instalación y las antenas de MO operan en el modo **línea de vista**, comúnmente espaciadas de 40 - 50 km de acuerdo con la cantidad de **desvanecimiento** de la señal de radio y con la disponibilidad de lugares adecuados para las torres de radio. La fórmula simple empírica recomendada por el CCIR para calcular la probabilidad de cierta cantidad de desvanecimiento es: la probabilidad de tener el desvanecimiento F de radio (en donde  $F > 15$  dB), y trayectorias claras de línea de vista con reflexión de Tierra despreciable, está dada por P en la expresión:

$$P = KQ10^{F10} f^B d^C$$

Distancias mayores a las de un solo salto de 40 - 50 km, se consiguen empleando trayectorias de multienlaces que comprenden cierto número de

estaciones repetidoras intermedias de radio. La propia trayectoria comúnmente se arregla en formación con ligero zig-zag de estaciones repetidoras. En cada estación repetidora existe una torre o mástil de radio, con un buen número de antenas de MO. Para cada trayectoria de transmisión que pasa a través de las estaciones repetidoras habrá cuando menos una antena de plato dirigida hacia la estación anterior y otra viendo hacia la estación siguiente, (dos platos pueden encarar a cada enlace, dependiendo de sí el mismo reflector de la antena se emplea tanto para transmitir como para recibir).

La señal de radio se recibe en una antena, y se retransmite sobre una dirección ligeramente distinta hacia el siguiente salto o enlace de la trayectoria mediante otra antena. El empleo de una trayectoria en zig-zag permite usar la misma frecuencia portadora de radio en todos los enlaces de la trayectoria completa, sin riesgo de radiointerferencia que puede resultar del **sobrealcance** en una trayectoria en la línea recta entre estaciones y repetidoras.

La refracción ligera que se produce por efecto de la atmósfera de la Tierra, provoca que las ondas de radio se propaguen a lo largo de una trayectoria curva, este hecho se debe tomar en cuenta al instalar las antenas.

Igual que otras formas de radio transmisión, el radio de MO constituye una forma efectiva de superar terrenos difíciles, si bien que el abastecimiento de la energía para las estaciones repetidoras intermedias sobre enlaces múltiples de largo alcance representa un serio problema. Los sistemas de MO, como otros sistemas de transmisión, están propensos al desvanecimiento que se genera por las condiciones climáticas que prevalecen. Perturbaciones de clima pueden producir interferencia en la trayectoria de radio. Debido a la longitud pequeña de las ondas de MO las

reflexiones sobre edificios y otros obstáculos cercanos a la trayectoria de radio, son causa de mayor interferencia que la que experimentan las señales con mayores longitudes de onda. Esto se conoce como **interferencia**. La planeación cuidadosa de la trayectoria y la elección apropiada del sitio para las torres de antena ayuda a minimizar este problema.

Los sistemas de MO comúnmente operan 2,4,6,11,12,14, 16 y 20 GHz. La portadora de MO se genera con un oscilador de MO y se modula de manera similar a las señales de radio de alta frecuencia, empleando el equipo de modulación que se conoce como **mezclador**. La onda de radio se refuerza inmediatamente después y antes de la transmisión con la ayuda de un amplificador sofisticado y con muy alta ganancia en potencia que se llama **tubo de onda progresiva (TOP)**. La onda de radio se alimenta entonces a la antena mediante un tubo hueco metálico (alimentador de guía de onda). La señal se emite desde el foco de una antena reflector parabólica para producir un haz altamente direccional. En el extremo receptor, una antena similar y un conjunto electrónico también semejante al del transmisor trabajan en sentido inverso para reproducir la señal original.

### **1.13. Sistemas de satélite.**

La transmisión mediante satélite constituye una excelente forma de comunicación a larga distancia ya sea alrededor de la Tierra o a través de un terreno difícil. También proporciona los medios efectivos para la radiodifusión de la misma señal hacia un gran número de estaciones receptoras.

Los tipos de satélites que más comúnmente se emplean en las redes de telecomunicaciones, son los satélites **geoestacionarios** que orbitan la Tierra directamente arriba del ecuador a una altura tal que viajan una vez alrededor del eje

de la Tierra cada 24 horas. Dado que tanto el satélite como la Tierra se mueven a la misma velocidad, desde un punto específico sobre la superficie de la Tierra en el ecuador, el satélite parecerá estar fijo geográficamente (geoestacionario).

Cuando un satélite geoestacionario se emplea para propósitos de telecomunicaciones, se equipa con antenas de MO, que permiten radio-contactos de línea vista entre el satélite y otras antenas de MO de estaciones terrenas localizadas en diferentes puntos de la superficie terrestre. Se puede, establecer la comunicación entre dos estaciones terrenas mediante la conexión tándem que consiste en un enlace de **subida** desde la estación transmisora hasta el satélite y en un **enlace de bajada** desde el satélite hasta la estación receptora. En el satélite, el enlace de subida se conecta con el enlace de bajada a través de un receptor (**respondedor**) para cada enlace de subida y de un **transmisor** para cada enlace de bajada y, debido a que los dos normalmente trabajan por pares se designa como un solo conjunto de equipo que es el **transponder**.

El primer satélite comercial de telecomunicación el **Telstar** se puso en órbita en 1962. Se trató de un satélite de órbita baja y no de un geoestacionario, orbitando la Tierra más rápido que la propia velocidad de rotación de la Tierra. En consecuencia, el satélite era mutuamente visible para estaciones terrenas de USA y Europa por tres o cuatro períodos al día, cada período tenía la duración de 30 a 40 minutos. Se requirieron entonces sofisticados mecanismos de rastreo en las primeras estaciones terrenas con el fin de mantener el reflector de la antena apuntando directamente hacia el satélite a medida que éste hacia su travesía desde un horizonte al otro en aproximadamente 30 minutos.

El avance definitivo de las telecomunicaciones internacionales vía satélite empezó en 1964 con el establecimiento del Consorcio Internacional de Telecomunicaciones por Satélite (INTELSAT). La primera generación de la serie de satélites de INTELSAT, INTESAT 1 (**Early Bird**) fue lanzado en 1965. El pájaro madrugador fue un satélite geoestacionario y los países del consorcio fueron los primeros en beneficiarse de sus servicios.

Los satélites INTELSAT desataron un "revuelo" en las telecomunicaciones internacionales entre finales de la década de los sesenta y durante la década de los setenta, debido a la alta capacidad de la transmisión vía satélite y al costo relativamente bajo de las conexiones extremadamente largas que permite. (Los costos de la transmisión vía satélite no están determinados por la distancia entre estaciones terrenas). Un inconveniente importante del satélite es el retardo significativo que sufre la señal de MO como resultado del tiempo que necesita para llegar hasta el satélite y regresar a la Tierra. Para los satélites geoestacionarios, el retardo es muy significativo, estando a 40,000 km de la Tierra parece un periodo de silencio de entre medio y un segundo entre el instante en que un participante termina de hablar y el instante en que escucha la respuesta. Para satélites con órbita más baja, el retardo es mucho menor. El problema histórico del rastreo del satélite regresa (como con el Telstar), pero el usuario está mucho más feliz con el retardo más corto. Por esta razón, la investigación tecnológica actual está regresando a desarrollar sistemas de órbita más baja, empleando tecnología sofisticada de estación terrena para el rastreo.

Los satélites de hoy en día son bastante más costosos que sus predecesores. En comparación con el Telstar, que tuvo un diámetro de 0.9 m y 77 kg de peso, los

satélites INTELSAT de sexta generación (INTELSAT VI) que atendieron las necesidades mundiales de telecomunicaciones en la primera mitad de los 90's, son verdaderas naves espaciales, semejantes a torres, con 12 m de altura, 4 m de diámetro y 2 toneladas de peso, cada satélite soporta hasta 110 mil canales telefónicos. Esto contrasta con los incipientes 12 circuitos que soportó el primer Telstar.

### **Dispersión Troposférica.**

**La dispersión troposférica** es un fenómeno que hace posible la comunicación sobre el horizonte. Las ondas de radio son reflejadas por la atmósfera en razón de las irregularidades de la región troposférica de la atmósfera terrestre. La reflexión (llamada comúnmente **dispersión**), ocurre en el **volumen común** de la atmósfera de la Tierra que corresponde a la región **visible** para ambas antenas de dispersión troposférica, la transmisora y la receptora. El ángulo de dispersión es el ángulo de desviación de la trayectoria, (ángulo de reflexión), causado por el efecto de dispersión.

Para la dispersión troposférica se emplean antenas grandes de forma de plato junto con frecuencias de radio de microondas en el rango de *800 MHz- 5 GHz*, Las distancias que se pueden lograr con los sistemas de radio-dispersión troposférica son de *100-300 km*. Su principal desventaja es el nocivo y continuo desvanecimiento de señal de que padece.

## RESUMEN

La mayoría de los tipos de transmisión se pueden emplear para transportar tanto señales de tipo analógico como digital: los circuitos de pares torcidos, los cables coaxiales y los sistemas de radio se pueden usar como base de los sistemas de transmisión de línea analógicos o digitales. Pero el hecho de que la transmisión digital requiere sólo dos estados distintos de línea (*prendido/apagado*) ha dado lugar a una nueva gama más amplia de métodos de propagación y el nuevo medio de transmisión digital más importante es la **fibra óptica**.

En virtud de la importancia creciente de las fibras ópticas el análisis del estado actual se presenta en el capítulo II.

## CAPÍTULO II

### LÍNEAS DE COMUNICACIONES EN FIBRA ÓPTICA

#### 2.1. Historia de las comunicaciones por fibra óptica.

Al igual que las ondas de radio, las ondas de luz son formas de energía electromagnéticas, y la idea de transmitir información utilizando la energía lumínica como portadora no es reciente. Alexander Graham Bell, luego de construir el primer teléfono hace más de un siglo, inventó en 1880 el fotofono, el cual transmitía mensajes vocales a través de un haz de luz. Las ondas de luz no tuvieron aplicación práctica, ya que se carecía de una fuente lumínica adecuada y de un medio de transmisión con bajas pérdidas.

Con la demostración del láser en 1960, comenzó nuevamente a ponerse atención sobre la idea de utilizar el haz de luz como medio de comunicación seguro, de gran velocidad y capacidad. Los esfuerzos por utilizar el rayo láser en las comunicaciones se vieron limitados debido a que la transmisión a través de la atmósfera depende de la visibilidad directa, es decir, requiere una exacta precisión de puntería y es severamente restringida por la neblina y las condiciones atmosféricas adversas.

El punto de partida para el logro de una solución práctica surgió de un artículo escrito por C. K. Kao y G. A. Hockman de la Standard Telecommunications Laboratories (subsidiaria de la ITT) en Inglaterra. Es una publicación del Instituto de Ingenieros Eléctricos (IEE de Londres) en Julio de 1966.

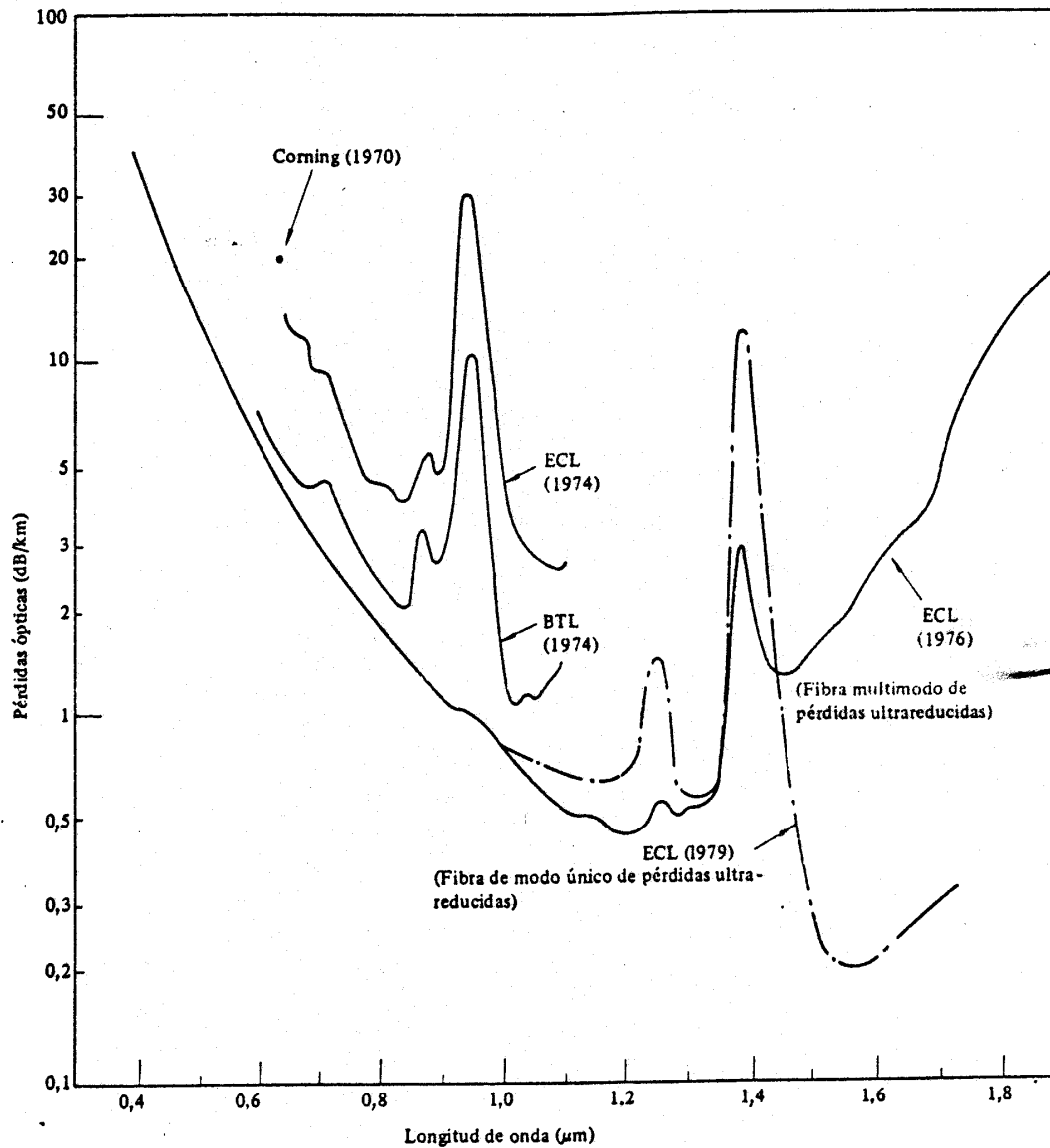
No fue posible llevar a la práctica este sistema hasta que, en el año 1970, Corning desarrolló una fibra de vidrio con una atenuación de  $20 \text{ dB/km}$ . Este fue el



momento a partir del cual comenzó un renovado interés por utilizar la fibra de vidrio como medio de comunicación.

En Japón se han continuado intensamente las investigaciones a fin de desarrollar los métodos de fabricación de las fibras, el cableado y las técnicas de empalme de las mismas. Estos estudios se llevan a cabo desde 1975 en el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas de la NTT (Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation) en cooperación con tres grandes fabricantes de cables, uno de los cuales es Sumitomo Electric Industries Ltd.

La figura 1 muestra el intenso progreso en el desarrollo de fibras de bajas pérdidas obtenido en los últimos años.

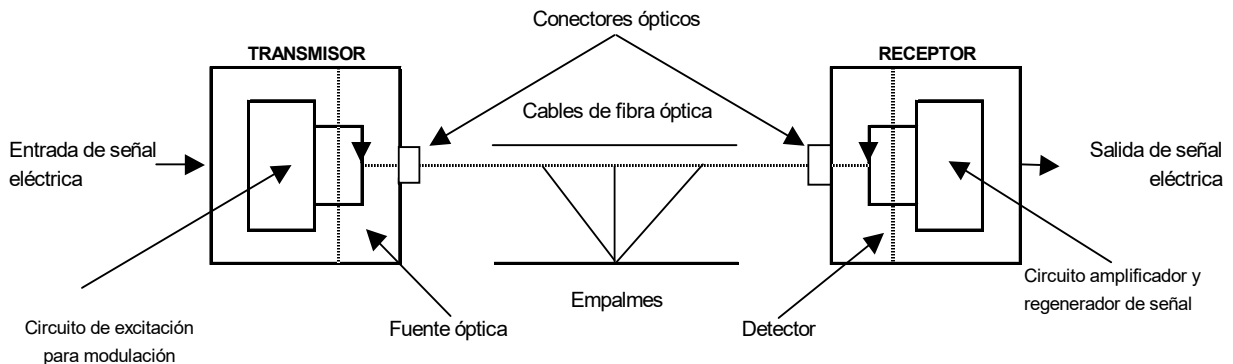


ECL: Electrical Communication Laboratory, NTT  
 BTL: Bell Telephone Laboratory  
 Corning: Trabajos realizados sobre vidrio por Corning.

Figura 1 - Progreso en la reducción de pérdidas en la fibra óptica [ x ].

## 2.2. Transmisiones por fibra óptica.

En La figura 2 se ilustra en forma esquemática la construcción básica de un sistema de transmisión por medio de cable de fibra óptica. En un sistema de transmisión óptico, la fuente óptica y el detector, que operan como convertidores (*eléctrico/óptico*), así como la fibra óptica, son los elementos básicos más importantes. En especial, cumple un papel muy importante en la construcción del sistema, el desarrollo de diodos láser tan pequeños en tamaño como los transistores. Esto es debido a que la interfaz entre las señales eléctricas y ópticas, es decir los convertidores E/O y O/E, puede ser montada en repetidores y equipos transmisores de tamaño convencional.



**Figura 2 - Construcción básica de un sistema de transmisión por fibra óptica.**

## 2.3. Principales características del cable de fibra óptica.

Las principales características de un cable de fibra óptica son las siguientes:

- ✓ El cable de fibra óptica posee muy bajas pérdidas en comparación con los cables convencionales. En consecuencia la separación entre repetidores en una línea de transmisión óptica; puede ser varias veces mayor a la necesaria en el caso de cables comunes.

- ✓ Es de reducido tamaño y tiene una amplia respuesta en frecuencia de banda base. Pueden propagarse simultáneamente en una fibra, ondas ópticas de varias longitudes de onda. Se cuenta, en definitiva, con una capacidad de transmisión sumamente elevada.
- ✓ Puede tenerse una línea de transmisión altamente confiable ya que la fibra no es afectada por acoplamientos eléctricos ni magnéticos debido a cables de tensión o fenómenos atmosféricos.
- ✓ Las características de transmisión son muy poco alteradas por cambios en la temperatura, siendo innecesarias y/o simplificadas la ecualización y compensación de las variaciones en tales propiedades.
- ✓ En general la diafonía entre fibras no es problema.
- ✓ Pueden fabricarse cables muy livianos ya que el peso específico del vidrio es la cuarta parte del que tiene el cobre.
- ✓ La materia prima utilizada en la fabricación de la fibra óptica, el  $\text{SiO}_2$ , es uno de los recursos que más abundan en la superficie terrestre.

Todos estos rasgos característicos del cable de fibra óptica se han dado comparados con los de un cable convencional. En los cables de cobre convencionales los principales factores a tener en cuenta para lograr características de bajas pérdidas son las siguientes: primero reducir la resistencia del alambre, y segundo reducir la capacidad entre pares de conductores. Con el objeto de satisfacer estos requerimientos es necesario aumentar las dimensiones del cable. Además es inevitable el incremento de las pérdidas en función de la raíz cuadrada de la frecuencia: En consecuencia, existen graves problemas para lograr bajas pérdidas a

frecuencias elevadas en los cables de cobre. Por otro lado, el cable de fibra óptica mantiene características de transmisión de banda ancha y reducidas pérdidas, independientemente del tamaño, debido a una reducción de las impurezas y fluctuaciones térmicas y con un estricto control del índice de refracción. Se han obtenido tales resultados tras mejorar el proceso de fabricación de la fibra.

El campo de aplicaciones del cable de fibra óptica es muy amplio a causa de las propiedades inherentes, tal como ya ha sido explicado. En la tabla 1 se ha esquematizado las características de la fibra.

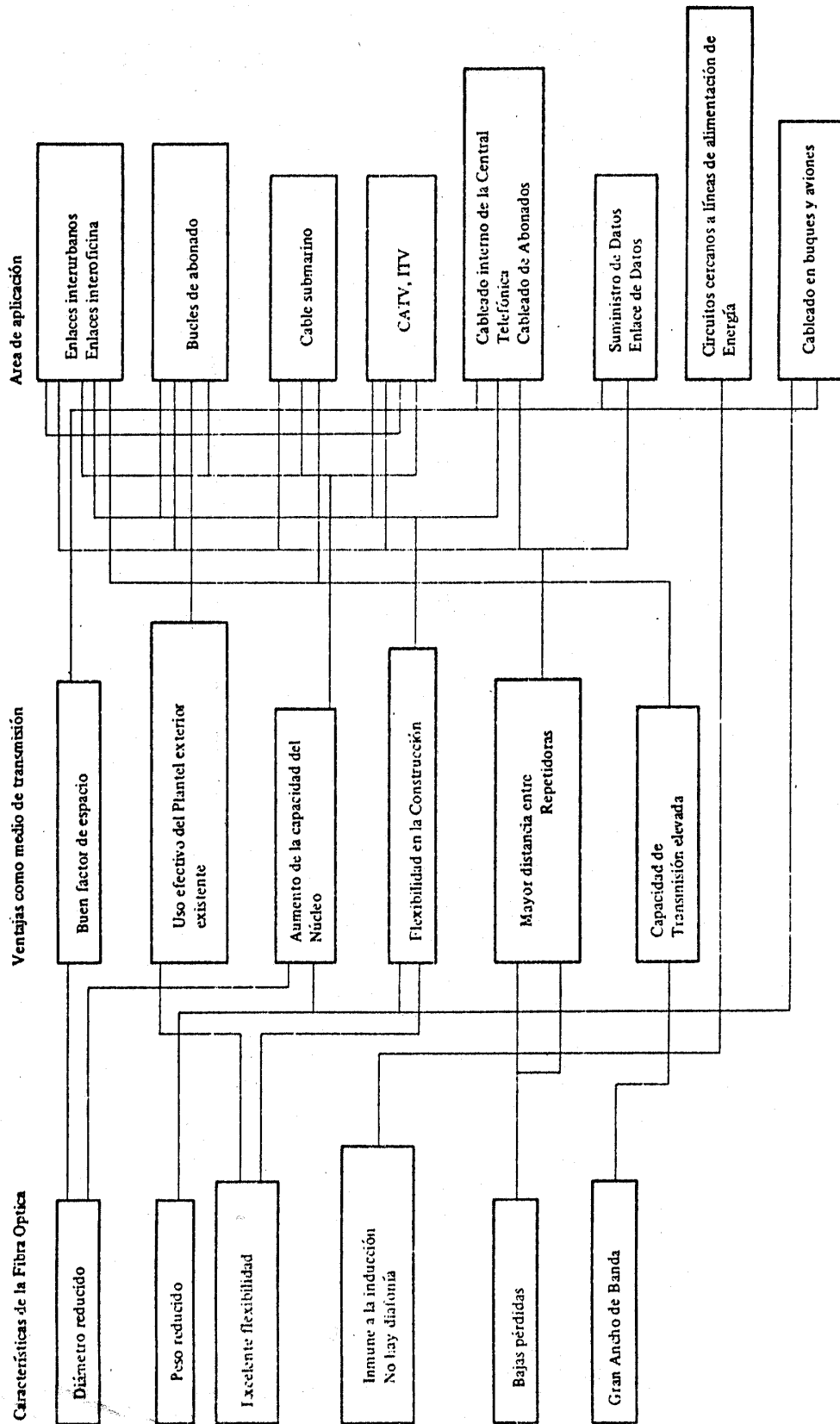
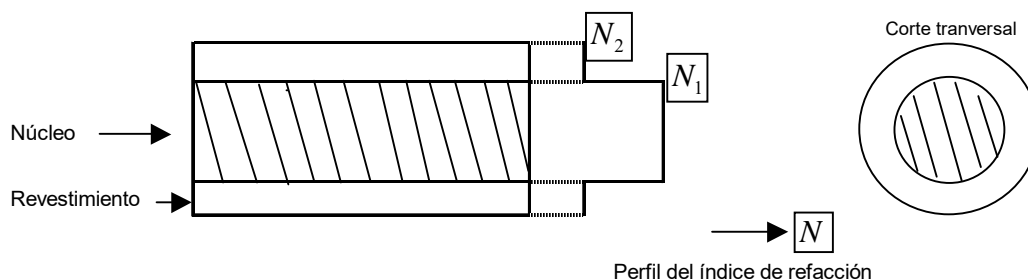


Fig. 1 - Transmisión por Fibra Optica y sus Aplicaciones

## 2.4. Estructura básica y clasificación del cable de fibra óptica.

En la figura 3 se esquematiza la estructura de la fibra. En ella se observa que dentro de la fibra se distinguen dos regiones con diferentes índices de refracción. Una de ellas, en el interior de la fibra, constituye el denominado núcleo (core), mientras que la otra, que recubre la anterior, es llamada revestimiento (cladding). Es necesario que el índice de refracción  $N_1$  del núcleo sea mayor que el  $N_2$  del revestimiento. Las ondas ópticas se propagan en el núcleo de la fibra sujetas al principio de reflexión total. Dentro de esta estructura, semejante a una guía de onda, las ondas ópticas tienen ángulos de propagación discretos específicos, los cuales se determinan en base a las relaciones de fase de las ondas ópticas a lo largo y normal al eje de la fibra. Las ondas que satisfacen dichas relaciones se denominan "modo".

El número de modos que se propagan en la fibra se determina según: la longitud de una onda óptica, la diferencia de índice de refracción entre núcleo y revestimiento, perfil del índice de refracción del núcleo, y dimensiones del núcleo. La fibra que admite un solo modo se denomina fibra monomodo (single-mode fiber) y aquella que admite varios modos se llama fibra multimodo (multimode fiber). La tabla 2 resume los rasgos característicos de las fibras monomodo y multimodo desde el punto de vista estructural y características de transmisión.



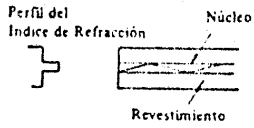
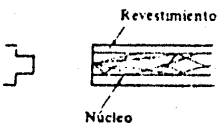
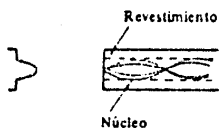
**FIGURA 3 - Estructura de la fibra óptica**

Según el tipo de perfil del índice de refracción de núcleo, la fibra multimodo se clasifica en índice escalón (step-index) e índice gradual (graded-index). La fibra de índice gradual, que tiene un perfil casi parabólico, posee características de banda ancha ya que en tal tipo de fibras las diferencias de velocidad de propagación entre modos son pequeñas. En la fibra monomodo no se producen los problemas peculiares de la fibra multimodo pues sólo puede propagarse un único modo. Sin embargo, las reducidas dimensiones del núcleo de la fibra monomodo provocan pérdidas en los puntos de unión entre fuente de luz y cable y en las conexiones entre cables. En general los diámetros del revestimiento y del núcleo de la fibra oscilan entre 100 - 300  $\mu\text{m}$  respectivamente. Para la fibra multimodo de índice gradual se ha adoptado en forma internacional 125  $\mu\text{m}$  para el diámetro del revestimiento y 50  $\mu\text{m}$  para el diámetro del núcleo.

La tabla 3 muestra otra clasificación de las fibras según el material.



**TABLA 2 - Clasificación de las fibras según el modo de propagación:**

|  | FIBRAS DE MODO UNICO   | FIBRAS MULTIMODO  |  |
|--|--|---|--|
|  |  | Indice escalón  | Indice gradual   |
| <b>Perfiles de Índice de Refracción y Propagación de Modo Óptico</b> |  <p>Perfíl del Índice de Refracción</p> <p>Núcleo</p> <p>Revestimiento</p>  |  <p>Revestimiento</p> <p>Núcleo</p> |  <p>Revestimiento</p> <p>Núcleo</p> |
| <b>Diámetro de Núcleo</b>  | algunos $\mu\text{m}$  | 40 - 100 $\mu\text{m}$  | 40 - 100 $\mu\text{m}$   |
| <b>Diferencia del Índice de Refracción Relativo *</b>                | 0,1 - 0,3 %  | 0,8 - 3%  | 0,8 - 1,5%   |
| <b>Pérdidas de Propagación</b>                                       | <p>La pérdida de propagación no depende de la clasificación precedente, siendo determinada básicamente por los componentes utilizados. Los valores representativos de la fibra de sílice fundido son: 3 dB/km (para 0,85 <math>\mu\text{m}</math> de longitud de onda y 0,5 dB/km (para 1,3 <math>\mu\text{m}</math> de long. de onda)</p> |   |  |
| <b>Ancho de Banda de la frecuencia de banda base.</b>                | Mayor que 10 GHz.km  | 10 -50 MHz.km   | Varios cientos MHz.KM algunos GHZ.km   |
| <b>Facilidad de empalme (Exactitud necesaria)</b>                    | Difícil (0,1 $\mu\text{m}$ )   | Relativamente sencillo (1 $\mu\text{m}$ )   | Relativamente sencillo (1 $\mu\text{m}$ )  |

\* Este valor relativo se define como  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$  donde  $n_1$  y  $n_2$  son los

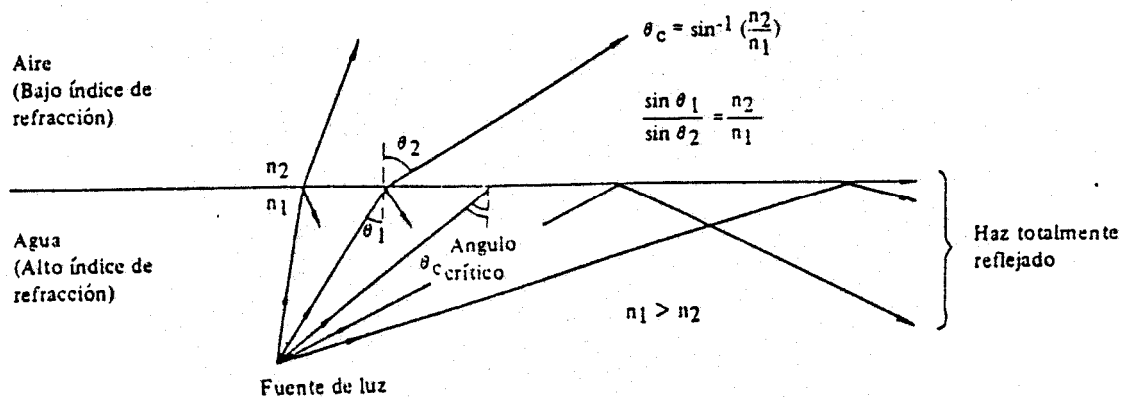
índices de refracción del núcleo y el revestimiento, respectivamente.

**TABLA 3 - Clasificación de las fibras ópticas según el material:**

| Clasificación de la fibra óptica                        | Material   | Rasgos característicos |                    |                    |                      | Clasificación según el modo de propagación              |
|---|--|------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---|
|   |  | Pérdidas               | Resistencia        | Confiabilidad      | Costos               |   |
| Fibras de sílice  | SiO <sub>2</sub> y dopantes (Ge, P, B, F, etc)               | Bajas                  | Alta               | Alta               | Elevado              | Modo único, multimodo (índice escalón e índice gradual) |
| Fibras con núcleo de sílice y revestimiento de plástico | Núcleo: SiO <sub>2</sub><br>Revestimiento: resina siliconada | Relativamente baja     | Relativamente alta | Relativamente Baja | Relativamente Barato | Multimodo con índice escalón                            |
| Fibra de vidrio multicompuesto                          | Cristal de Borosilicato alcalino                             | Relativamente Baja     | Relativamente baja | Baja               | Relativamente Barato | Multimodo (índice escalón e índice gradual)             |
| Fibra de plástico                                       | Varios plásticos   | Alta                   | Baja               | Baja               | Barato               | Multimodo   |

## 2.5. Teoría de propagación de la fibra óptica

Las ondas ópticas que se propagan a lo largo del núcleo se reflejan en el límite núcleo-revestimiento. Este hecho se grafica a continuación en la figura 4.



**FIGURA 4 - Reflexión total de la luz.**

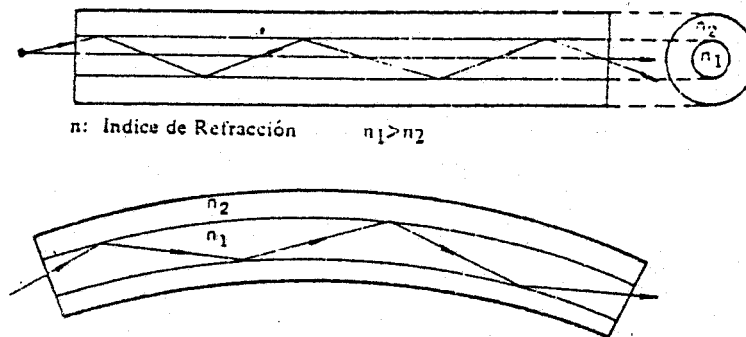
Se observa una onda óptica que incide, desde un medio de alto índice de refracción, a uno de bajo índice. En el límite, una parte del rayo es reflejada y el resto es transmitido. Sin embargo, cuando el haz incide con un ángulo mayor que el crítico

$\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$  todo el haz es reflejado. Dicho fenómeno puede observarse

frecuentemente, por ejemplo en el limbo entre el aire y el agua. De esta manera, aquella onda óptica con un reducido ángulo de propagación con respecto al eje de la fibra queda confinada en el núcleo y se propaga a lo largo de dicho eje. En general, el ángulo crítico en las fibras ópticas utilizadas para la transmisión varía entre 75° y 85°. Esto significa que pueden transmitirse a través de las fibras aquellas ondas ópticas con ángulos de propagación entre 0° y 15°.

A continuación se esquematiza en la figura 5 la propagación de la onda óptica dentro de la fibra. Aún cuando la fibra es doblada, con un radio de curvatura grande, la onda se propaga sin pérdidas apreciables. Sin embargo, a medida que el radio de curvatura es reducido, las pérdidas aumentan considerablemente. Esto se debe a que, cuando el ángulo de propagación es cercano a  $\frac{\pi}{2} - \theta_c$  en la porción curvada

se excede dicho valor y la onda óptica se interna en la región del revestimiento



provocando las pérdidas.

**FIGURA 5 - Propagación de la luz en la fibra óptica.**

## **2.6. Características de transmisión en la fibra óptica.**

Las principales características de transmisión en la fibra óptica son:

### **1.- Pérdidas ópticas:**

- ✓ Pérdida intrínseca de la fibra óptica
- ✓ Pérdida debido a curvaturas de la fibra
- ✓ Pérdidas de conexión de fibras
- ✓ Pérdidas de acoplamiento entre fibras y dispositivos ópticos, fuente óptica a la entrada y detector a la salida.

### **2.-Respuesta en frecuencia de la banda base.**

#### **2.6.1. Pérdidas de transmisión en la fibra óptica**

Las pérdidas intrínsecas en la fibra son debidas a la dispersión y a la absorción de las ondas ópticas que se propagan en la fibra.

Los principales factores son:

- ✓ Dispersión de Rayleigh.

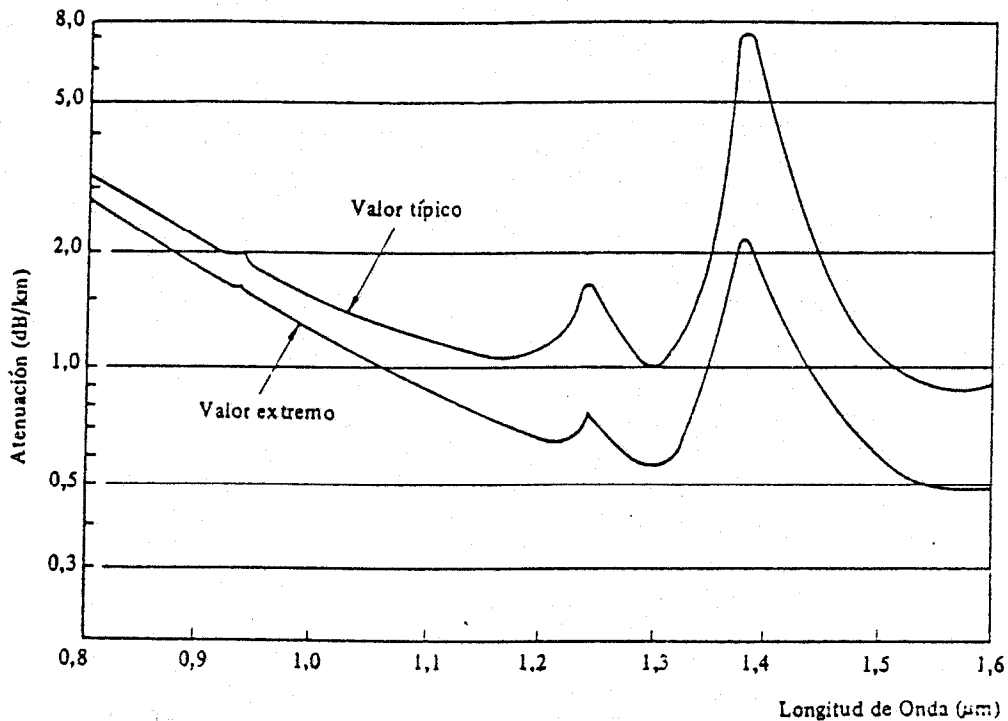
- ✓ Absorción intrínseca en las regiones infrarroja y ultravioleta.
- ✓ Absorción debida a impurezas tales como iones OH e iones metálicos de transición.
- ✓ Radiación y dispersión debidas a imperfecciones en la estructura de la fibra.

La dispersión de Rayleigh se debe a fluctuaciones microscópicas del índice de refracción en el núcleo, siendo estas pérdidas inversamente proporcionales a  $\lambda^4$ .

En cuanto a la absorción debida a iones OH, el pico fundamental de absorción se encuentra a una longitud de onda de 2,8  $\mu\text{m}$ , mientras que la segunda y tercera armónica aparecen en 1,4  $\mu\text{m}$  y 0,94  $\mu\text{m}$  respectivamente. Sin embargo, recientes mejoras en la tecnología de fabricación de las fibras, que previenen la introducción de iones OH en la fibra, reducen considerablemente las pérdidas. Por ejemplo, la fibra de sílice fabricada con el método MCVD no presenta picos de tercera armónica en  $\lambda = 0,94 \mu\text{m}$ . Las pérdidas de absorción debido a metales de transición son también despreciables, ya que la materia prima es cuidadosamente purificada hasta tener un contenido de impurezas menor que 1 ppb (una parte por billón).

En consecuencia, para la fibra de sílice, el principal factor de pérdidas es la dispersión de Rayleigh, en la región de longitudes de ondas visibles e infrarrojas (debajo de 1,3  $\mu\text{m}$ ).

En la figura 6 se muestra la curva de atenuación espectral de una fibra de índice gradual construida mediante el método VAD.



**FIGURA 6 - Curva de atenuación espectral de una fibra de índice gradual construida mediante el método VAD.**

## 2.7. Respuesta en frecuencias de banda base.

La respuesta en frecuencia de banda base es otro de los factores importantes en el diseño de un sistema de transmisión óptico.

Se determina mediante los siguientes factores:

1. Dispersión de modos, que surge de la diferencia de retardo de grupo entre modos.
2. Dispersión del material, debido a que el índice de refracción depende de la longitud de onda óptica
3. Dispersión de guía de onda, producto de la diferencia en la dependencia de longitudes de onda del tiempo de retardo de grupo para cada modo, originados por la estructura de la guía de onda (fibra óptica).

En la dispersión del material, la velocidad de grupo de la onda óptica está directamente relacionada con el índice de refracción y se tiene diferencia de velocidad aún en un modo debido a la disgregación de longitudes de la fuente óptica.

Con el objeto de entender claramente estas dispersiones, se han esquematizado los modos de propagación sujetos a las dispersiones. La limitación en ancho de banda es equivalente a la dispersión de pulsos de señal de transmisión que surgen debido a la diferencia en la velocidad de grupo.

Según se observa en la tabla 4, la dispersión de modo es la diferencia de velocidad de grupo entre modos, siendo éste un rasgo característico de las fibras multimodo. Las ondas ópticas correspondientes a cada modo se propagan por diferentes caminos, uno de otro; siendo diferentes los instantes en que llegan a la salida cada una de las ondas. En consecuencia un pulso agudo a la entrada se transforma en un pulso ancho a la salida.

Para una fuente lumínica que tiene simultáneamente diferentes componentes de longitud de onda, la dispersión de materiales provoca cambios en la velocidad de grupo. Usando tal fuente lumínica, un pulso de entrada agudo se transforma en uno ancho a la salida, tal como se observa en la tabla 4. Este fenómeno es el principal limitador de ancho de banda en una fibra monomodo.

El ensanchamiento de los pulsos de luz a la salida de la fibra óptica es un fenómeno adverso, ya que un cero lógico entre los dos unos lógicos queda “tapado” y el detector no lo reconoce.

Este fenómeno también se presenta en conductores metálicos cuando estos tienen un ancho de banda reducido, lo que origina que los pulsos tengan un tiempo de subida (y bajada) muy grande.

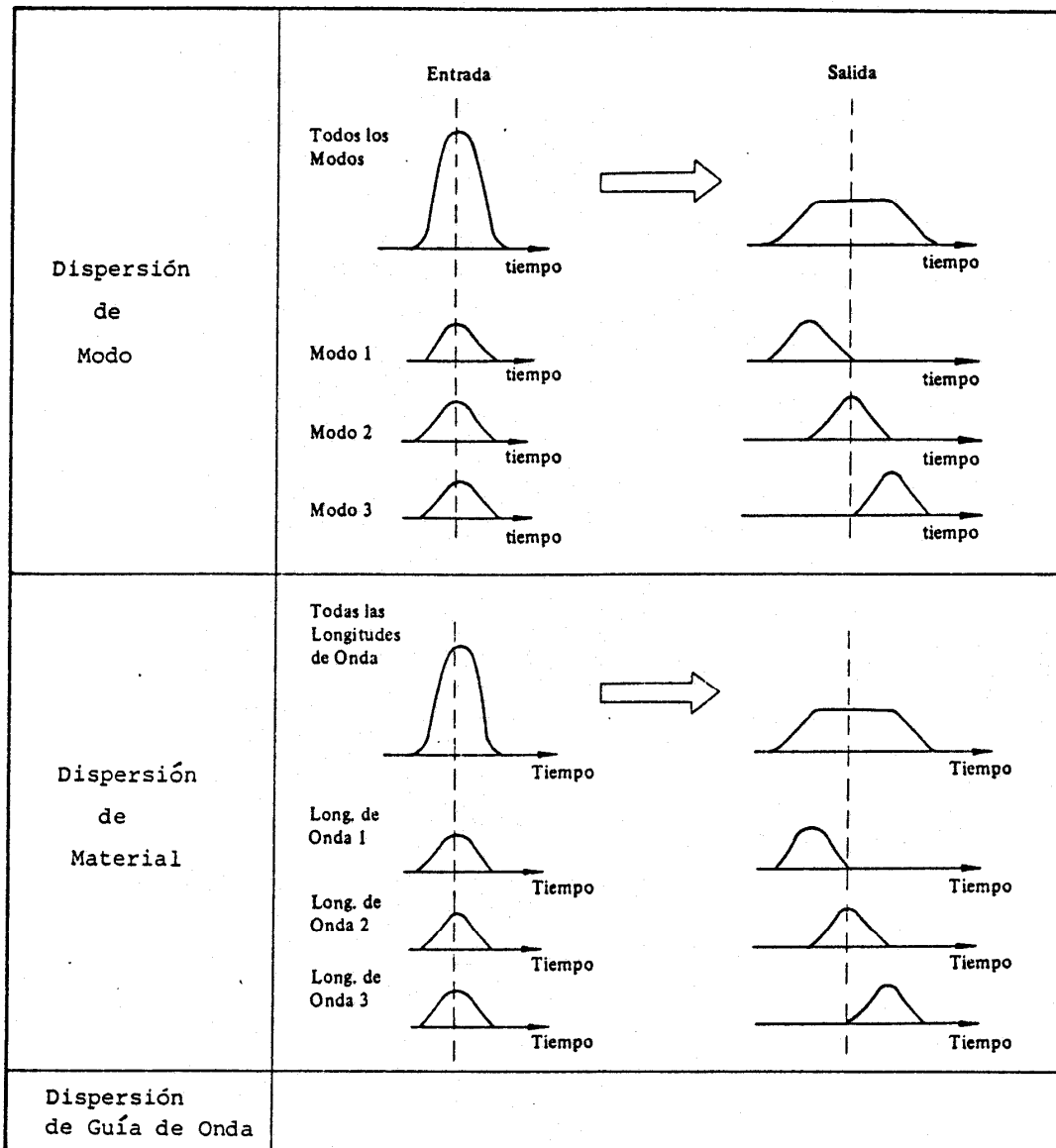


TABLA 4 - Factores que restringen el ancho de banda.



En general las fibras multimodo mantienen las siguientes relaciones:

(Dispersión de modo) > (Dispersión de material) > (Dispersión de guía de onda). Es decir que el principal factor de limitación de ancho de banda es la dispersión de modo. En las fibras multimodo de índice gradual, cuyo perfil de índice tiende a ser parabólico, la diferencia de tiempo de retardo de grupo entre modos, llamada dispersión de modo, es muy pequeña, teniendo la fibra características de frecuencia de banda ancha.

En fibras multimodo reales, se producen acoplamientos complejos de modos debido a varias causas, tales como curvatura de cables o imperfecciones estructurales y la respuesta en frecuencia de banda base no presenta una característica simple. Mediante la presente tecnología se logran fibras de índice gradual de ancho de banda 6 dB de hasta 1 GHz.km. El ancho de banda 6 dB se define como la frecuencia a la cual la amplitud de la señal eléctrica recibida es la mitad de la amplitud en C.C.

Por otro lado la dispersión de modo es esencialmente cero en las fibras de modo único, siendo las dispersiones de material y de guía de onda las que restringen su ancho de banda. En las fibras de sílice, la suma de estas dos dispersiones se torna cero en la región de 1,3  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. En consecuencia no es necesaria una restricción del ancho espectral de la fuente óptica para operar en la región de alta frecuencia.

En la figura 7 se esquematiza la respuesta en frecuencia de banda base de una fibra MCVD en la vecindad de 0,85  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. En la figura 8 se observa la repuesta en frecuencia de banda base de una larga fibra de VAD a 1,3  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.

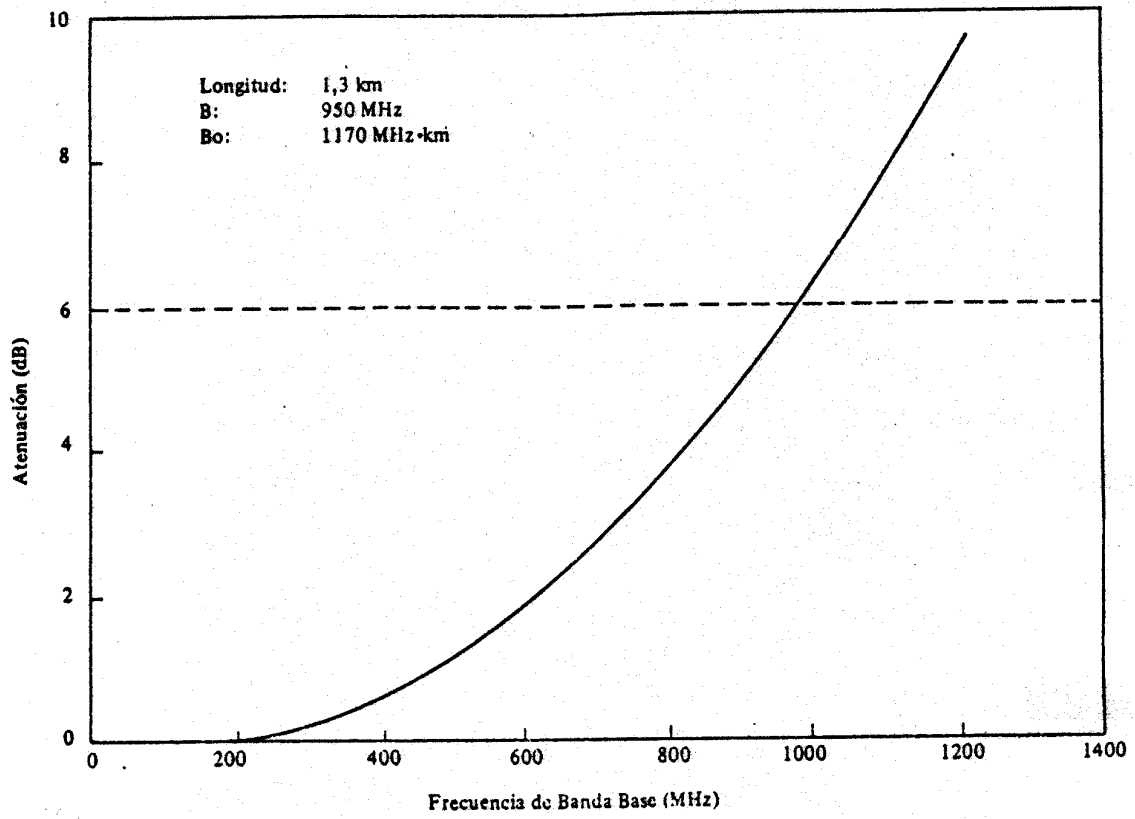
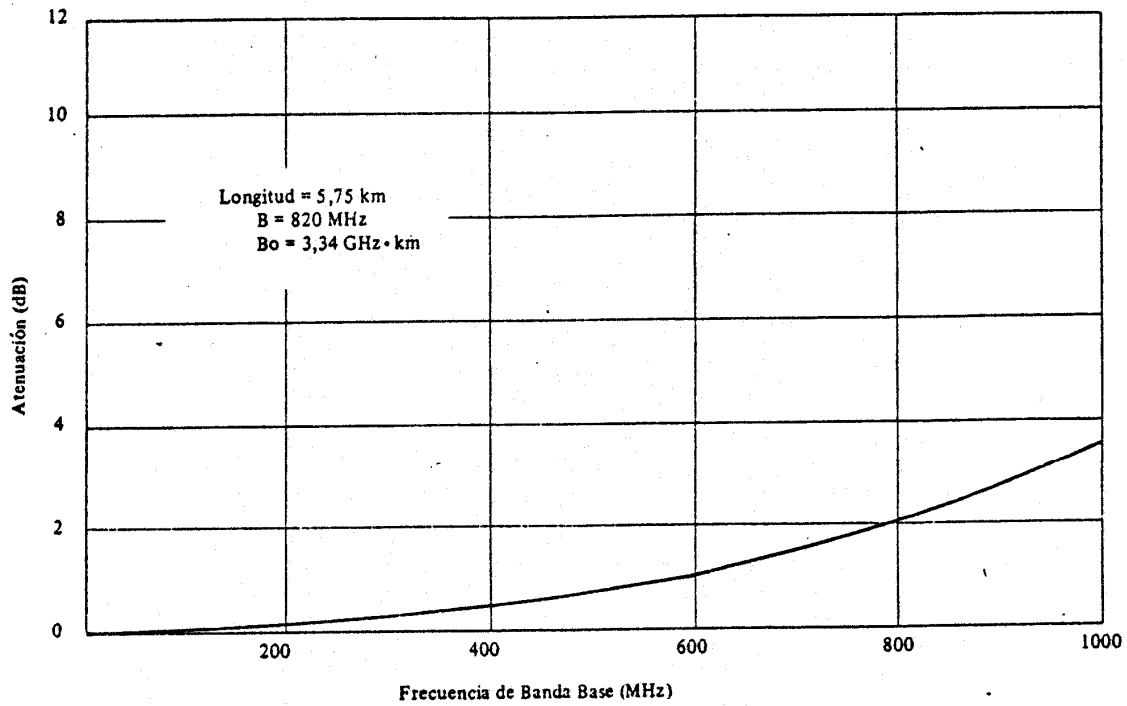


FIGURA 7- Respuesta en frecuencia de banda base típica de una fibra MCVD a 0,83  $\mu\text{m}$ .



**FIGURA 8 - Respuesta en frecuencia de banda base de una fibra VAD a 1,3 μm.**

La relación entre el ancho de banda 6 dB y la longitud del cable es la

siguiente:  $B = B_0 L^{-0.8}$

donde  $B$  : ancho de banda por longitud

$B_0$  : ancho de banda por 1 km de longitud

$L$ : longitud.

## 2.8. Características de transmisión en fibras de gran longitud con empalmes.

En la tabla 5 se tiene una lista de fibras MCVD que han sido empalmadas por el método de fusión por arco, para obtener una línea de transmisión de 13.27km de longitud, evaluándose la relación que existe entre las pérdidas de transmisión o la respuesta en frecuencia de banda base y la longitud de la fibra. La pérdida total incluyendo once empalmes, fue de  $\left(\frac{36.0dB}{13.27km}\right)$  a una longitud de onda de 0,85  $\mu m$ , que es casi el mismo valor que se obtienen sumando las pérdidas de 12 fibras  $\left(\frac{34.1dB}{13.27km}\right)$  y las pérdidas en los empalmes (*aprox.*0.2dBx11puntos = 2,2dB)

| <b>Fibra No.</b> | <b>Longitud de la fibra<br/>(km)</b> | <b>Pérdidas de Transmisión a 0,85 um<br/>(dB/km)</b> | <b>Ancho de Banda<br/>6 dB<br/>(MHz.Km)</b> |
|------------------|--------------------------------------|--|---|
| <b>1</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,60</b>  | <b>990</b>                                  |
| <b>2</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,65</b>  | <b>1,180</b>                                |
| <b>3</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,57</b>  | <b>1,110</b>                                |
| <b>4</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,53</b>  | <b>1,1190</b>                               |
| <b>5</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,55</b>  | <b>920</b>                                  |
| <b>6</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,68</b>  | <b>820</b>                                  |
| <b>7</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,46</b>  | <b>1,090</b>                                |
| <b>8</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,58</b>  | <b>1,090</b>                                |
| <b>9</b>         | <b>1,106</b>                         | <b>2,46</b>  | <b>730</b>                                  |
| <b>10</b>        | <b>1,106</b>                         | <b>2,61</b>  | <b>1,050</b>                                |
| <b>11</b>        | <b>1,106</b>                         | <b>2,51</b>  | <b>950</b>                                  |
| <b>12</b>        | <b>1,106</b>                         | <b>2,55</b>  | <b>800</b>                                  |
| <b>Total</b>     | <b>13,272</b>                        | <hr/>  | <hr/>                                       |

TABLA 5 - Características de transmisión de las fibras en una línea de 13,27 Km de longitud.

En la figura 9 podemos ver que se obtuvo la relación entre el ancho de banda 6 dB y la longitud de la fibra, midiendo los anchos de banda en cada punto de empalme.

El valor teórico del ancho de banda de 6 dB se calcula mediante la siguiente

ecuación: 
$$\hat{B} = \left[ \sum_{k=1}^N B_k^{-1/0.8} \right]^{-0.8}$$

donde  $B_k$ : ancho de banda de 6 dB por unidad de longitud en el K-ésimo punto

de empalme. El ancho de banda medido es de 130 MHz/13,27 Km y el valor calculado es de 125 MHz/13,27 km.

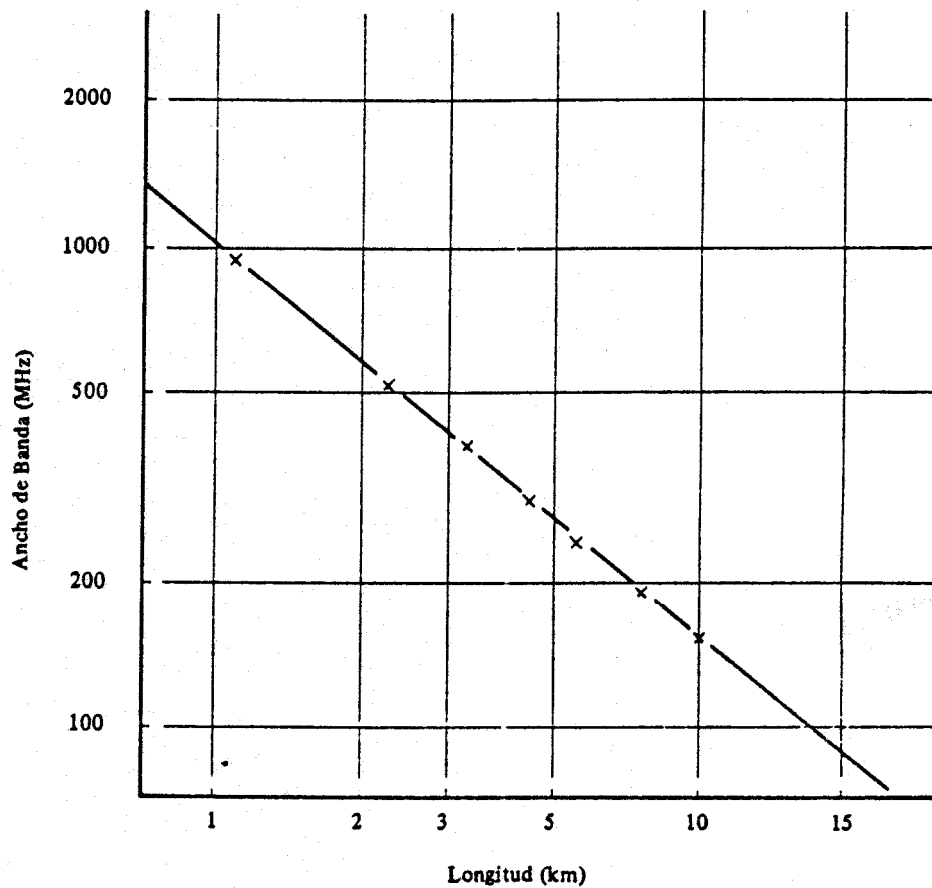


FIGURA 9 Ancho de banda de una línea de transmisión de 13,27 km longitud.

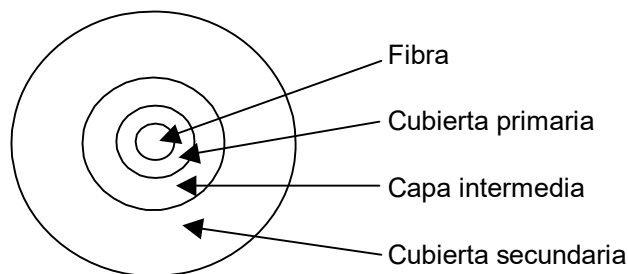
## 2.9. Estructura de la fibra recubierta.

La fibra de vidrio es recubierta con materiales plásticos con el objeto de preservar la resistencia intrínseca, protegiendo la superficie de la fibra contra la humedad, abrasión química y mecánica, y para prevenir excesos en las pérdidas de transmisión debidas a microcurvaturas. Para ello fue desarrollada una fibra recubierta de tres capas cuya estructura se ve en la figura 10, y en la tabla 6 se muestran los parámetros de las fibras recubiertas relativos al corte transversal de la figura.

Como cubierta primaria se utiliza una silicona especial, que tiene un índice de refracción mayor que el de la fibra de vidrio, con el objeto de mejorar las características de transmisión, la resistencia y la confiabilidad a largo plazo.

Entre la cubierta secundaria y la primaria se coloca una capa intermedia (buffer) de resina siliconada para mitigar la presión y reducir las pérdidas ópticas por variación de temperatura.

Como cubierta secundaria se utiliza una capa de nylon para mejorar la resistencia a la abrasión y permitir un mejor manipuleo de la fibra.



**FIGURA 10 - Estructura de la fibra cubierta.**

**TABLA 6 - Parámetros de la fibra recubierta.**

| Diámetro de la fibra óptica | Cubierta primaria |                          | Capa intermedia   |                   | Cubierta secundaria |          |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|
|                             | Material          | Diámetro                 | Material          | Diámetro          | Material            | Diámetro |
| 125 $\mu\text{m}$           | Silicona          | Aprox. 200 $\mu\text{m}$ | Resina siliconada | 400 $\mu\text{m}$ | Nylon-12            | 0,9 mm   |

## 2.10. Diseño del cable de fibra óptica.

El diseño del cable de fibras ópticas tiene un concepto diferente al de los cables metálicos convencionales debido a las propiedades de la fibra. Los dos mayores problemas son la estabilidad en las características de transmisión y la protección contra la rotura de la fibra. Los cables de fibra óptica deben satisfacer también las exigencias prácticas, tales como resistencia del cable, fácil manipuleo y mantenimiento, etc., comunes a los cables convencionales. Al mismo tiempo es necesario que los cables de fibra óptica sean ligeros y que cada unidad sea de una longitud tal que permita una instalación de larga distancia con el menor número de empalmes posibles entre repetidoras.

El cable de fibra óptica debe diseñarse de manera que las propiedades no sean deterioradas durante el proceso de fabricación e instalación del cable, manteniéndose estable ante cambios de temperatura. La fibra óptica debe estar dentro del cable, libre de toda presión externa irregular, para salvar deterioros por



microcurvaturas. Para este propósito Sumitomo Electric Industries Ltd. ha desarrollado un cable de fibra óptica con separadores tal como se observa en las figuras 11 y 12.

En el centro del cable se coloca un miembro de tensión que posee un elevado módulo de Young, para permitir la instalación del cable de fibra óptica dentro de ductos. Alrededor del miembro de tensión se ubican separadores de plástico en forma de U donde se acomodarán las fibras ópticas. El uso de separadores permite combinar las fibras ópticas con pares o cuadretes de conductores de cobre. La redondez y firmeza del núcleo de cables se logra envolviéndolo con una cinta. Con el objeto de proteger el núcleo del cable contra la humedad y esfuerzos externos, se le cubre con una envoltura de polietileno con aluminio laminado.

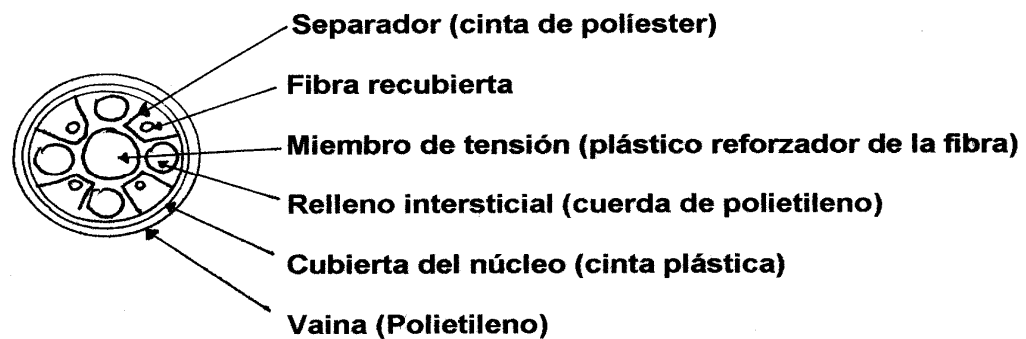


FIGURA 11 Cable de cuatro fibras con separadores  
(tipo no-metálico)

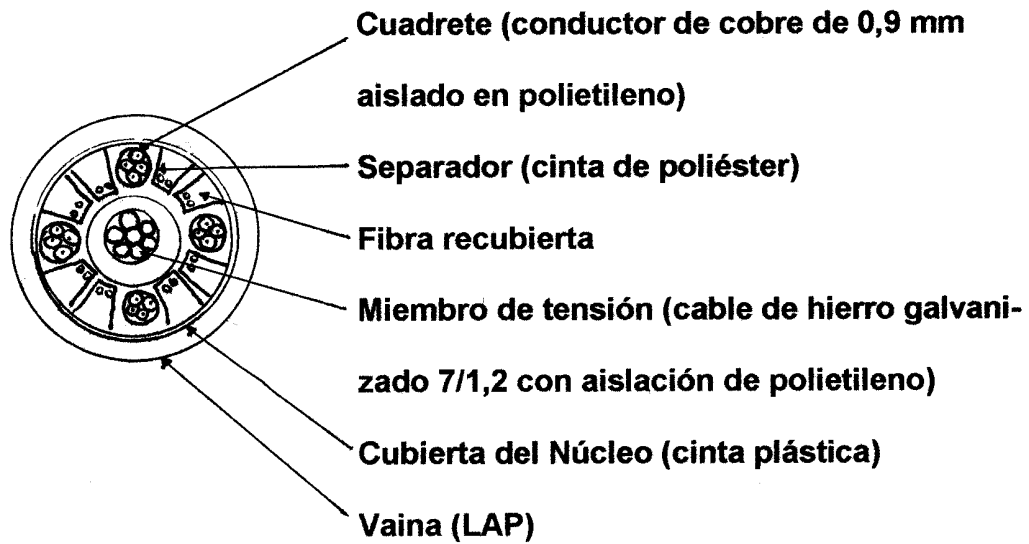


FIGURA 12 Cable de dieciséis fibras con separadores  
(tipo metálico).

Diámetro del cable = 22 mm

Peso del cable = 410 kg/km

## 2.11. Fabricación del cable de fibra óptica.

En la siguiente tabla (8) se muestra un diagrama de flujo de la fabricación de un cable de fibra óptica.











| Proceso  | Descripción   |
|--|---|
| <br>Preforma                                | Se fabrica el material madre de la fibra llamada varilla de preforma.   |
| <br>Templado                                | Las varillas de preforma se templan para obtener fibras del diámetro requerido (125~150µm con resina siliconada)  |
| <br>Inspección intermedia                   | Inspección de calidad, que incluye: diámetros del núcleo y del revestimiento, diferencia del índice de refracción, perfil del índice, pérdida de transmisión, respuesta en frecuencia de banda base, etc. |
| <br>Recubrimiento de la fibra              | Como segundo revestimiento se agrega, a la fibra con resina siliconada, una cubierta de nylon.  |
| <br>Inspección intermedia                 | Inspección de calidad, incluyendo diámetro del <del>segundo</del> revestimiento, pérdidas de transmisión, respuesta en frecuencia de banda base, etc.   |
| <br>Trenzado                              | Se procede al trenzado de las fibras revestidas y de los cuadretes intersticiales para obtener la forma del cable.  |
| <br>Inspección intermedia                 | Se verifican las características y construcción del cable de acuerdo a las normas de inspección intermedia.   |
| <br>Cubierta del cable mediante extrusión | Sobre la forma del cable se aplica una cubierta de polietileno o de polietileno con aluminio laminado (LAP) para protección del cable.  |
| <br>Inspección del producto terminado     | Inspección de los productos terminados de acuerdo con las normas de inspección.   |
| <br>Despacho                              | Una vez embalado, el cable se envía por vía terrestre, marítima o aérea.  |

Tabla 8 Fabricación de fibras ópticas

## 2.12. Fabricación de las fibras de sílice.

Actualmente se utiliza el sílice para la fabricación de fibras ópticas de bajas pérdidas. Se utiliza este elemento pues tiene la mayor transparencia que puede presentar un material a la longitud de onda utilizada en transmisión, es decir  $0,7\sim 1,6\mu\text{m}$ . Sin embargo, para obtener bajas pérdidas, la pureza del sílice y los materiales agregados (llamados "aditivos") para modificar el índice de refracción del sílice, debe ser sumamente alta. Se utilizan como aditivos:  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_5$ , y otros más.

Para obtener materiales de elevada pureza se hace comúnmente una reacción en estado gaseoso. Se obtiene así el material madre de la fibra (llamado "varilla de preforma") que tiene un diámetro que oscila desde pocos milímetros hasta  $10 \sim 20$  mm y el índice de refracción requerido.

Las fibras ópticas se obtienen a través del templado de estas varillas de preforma.

En este método, para hacer una reacción en estado gaseoso, se suministran gases ( $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ ) y otros junto con  $\text{O}_2$  en un tubo de silicio giratorio, el cual es calentado exteriormente con una llama de Oxígeno Hidrógeno. En las figuras 13 y 14 se esquematiza dicho proceso.

Dentro del tubo se forman materiales cristalinos tales como  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  etc., por oxidación, y se van depositando dentro de dicho tubo.

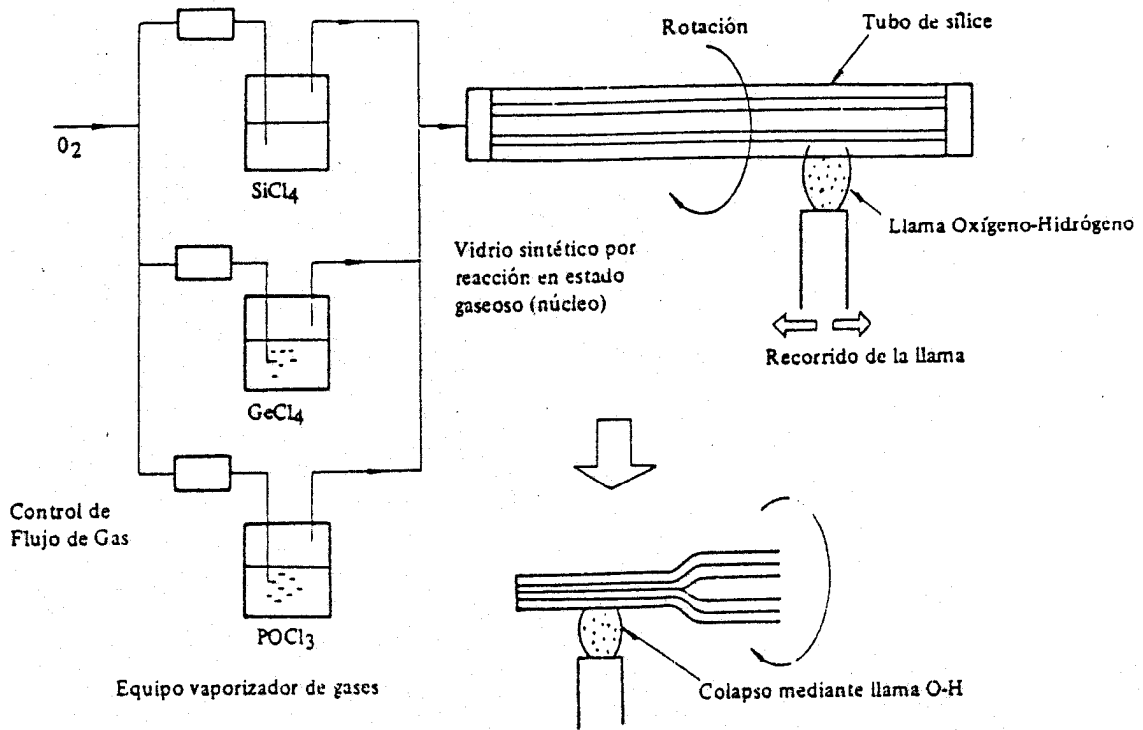


FIGURA 13 - Método MCVD.

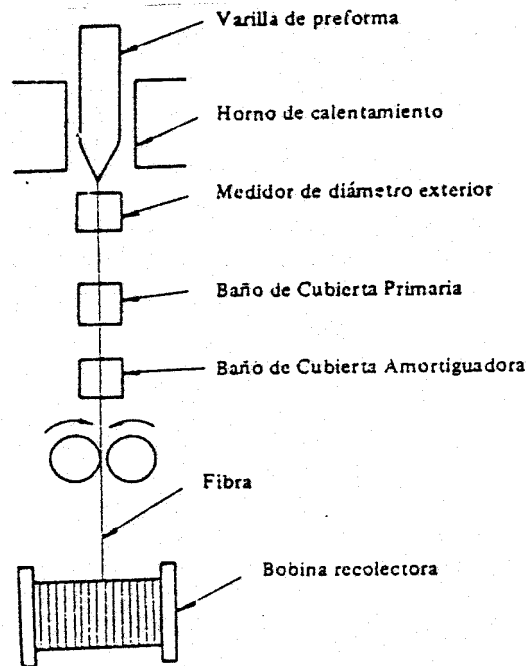


FIGURA 14 - Templado de la fibra.

El material depositado constituye posteriormente el núcleo de la fibra, el cual se colapsa obteniéndose una varilla sólida y redonda llamada varilla de preforma. Esta varilla es luego templada, tal como se observa en la figura anterior, para obtener la fibra.

Todo el proceso de deposición interior del método MCVD, se realiza dentro de un ambiente cerrado con el objeto de impedir la introducción de impurezas. Con este método se pueden fabricar fácilmente fibras de bajas pérdidas; sin embargo, como las varillas de preforma no pueden ser muy largas no es posible obtener fibras de longitud considerable, lo cual representa un problema. El equipamiento utilizado en este método puede fabricarse en forma relativamente sencilla y las fibras obtenidas tienen características bastante buenas.

#### **Métodos de deposición gaseosa axial (método VAD).**

Este método fue desarrollado por el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas en Ibaraki de la N.T.T., con la colaboración de Sumitomo Electric Industries, Ltd. En la figura 15 se esquematiza el proceso. Una de las características de este método es que se obtiene una varilla de preforma porosa como material madre de la fibra, la cual se verificara continuamente hasta su cristalización. Eso soluciona uno de los problemas de los métodos convencionales, la discontinuidad en el proceso de fabricación.

Observando la figura 15 vemos el  $SiCl_4, GeCl_4$ , etc., en estado gaseoso, los cuales formarán el tizne vítreo, son insuflados con el gas portador  $O_2$  junto con una llama de Oxígeno-Hidrógeno desde el extremo inferior de la varilla de sílice en rotación. De esta manera se va formando, en la sección inferior de la varilla de sílice,

un material poroso de tizne vítreo en forma cilíndrica. La varilla de sílice es izada mientras gira obteniéndose la varilla de preforma, que será el material madre de la fibra, tras un proceso de verificación haciendo pasar el elemento poroso a través de un anillo calentador. La distribución del índice de refracción requerida se obtiene variando las cantidades de  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ , etc., insufladas de las boquillas. Tal como se observa, el número de quemadores puede incrementarse cuando uno solo no es suficiente para obtener el índice de refracción requerido. Este método es conveniente para la producción en masa de fibras debido a que puede obtenerse la varilla de preforma mediante un proceso continuo.

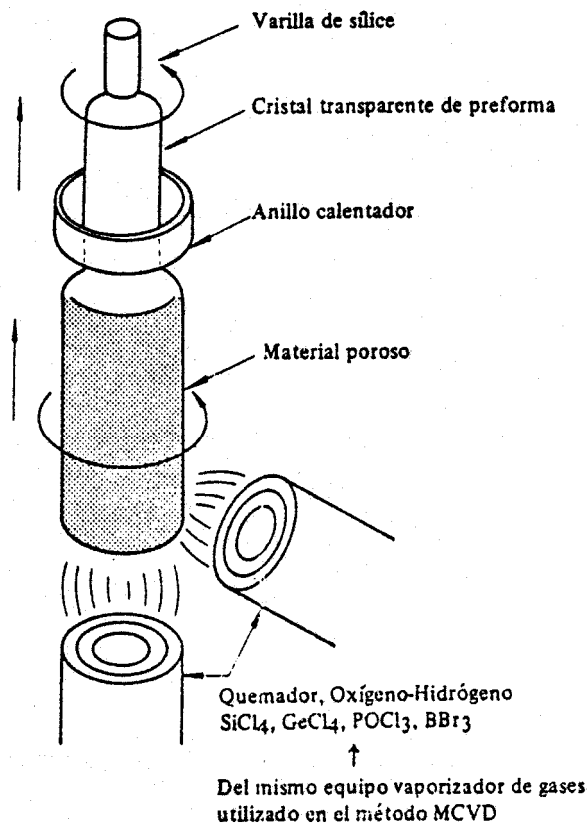


FIGURA 15 - Método VAD.

### **2.13. Trenzado de las fibras ópticas.**

En la figura 16 se esquematiza el método de trenzado de las fibras ópticas. Una cinta es pasada a través de spacer former que dobla la misma, obteniéndose los separadores en forma de U ó V en el extremo de la línea de montaje, siendo luego trenzados. Es preferible el uso de cintas de polietileno de espesor considerable como separadores, desde el punto de vista de resistencia mecánica y de forma del cable, cumpliendo un papel muy importante para el logro de este objetivo los spacer formers.

La tensión aplicada durante este proceso deberá ser tan pequeña como sea posible, e igual para todos los separadores que son trenzados simultáneamente. Manteniendo uniforme la tensión y las dimensiones de los separadores se logra un núcleo del cable firme y redondo.

Luego del trenzado de los separadores, el núcleo de cable se envuelve con cintas que contribuyen a hacerlo rígido y fuerte. Es posible utilizar las máquinas de trenzado convencionales, pues no es necesario el uso de separadores prearmados ni de sincronismo especiales.

A fin de proteger los cables contra esfuerzos externos, durante y después de la instalación y evitar el filtrado de agua dentro de los mismos, se recubren con una vaina, la cual puede estar hecha de alguno de los siguientes materiales:

- Polietileno (PE)
- Cloruro de Polivinilo (PVC)
- Polietileno de Aluminio Laminado (LAP)



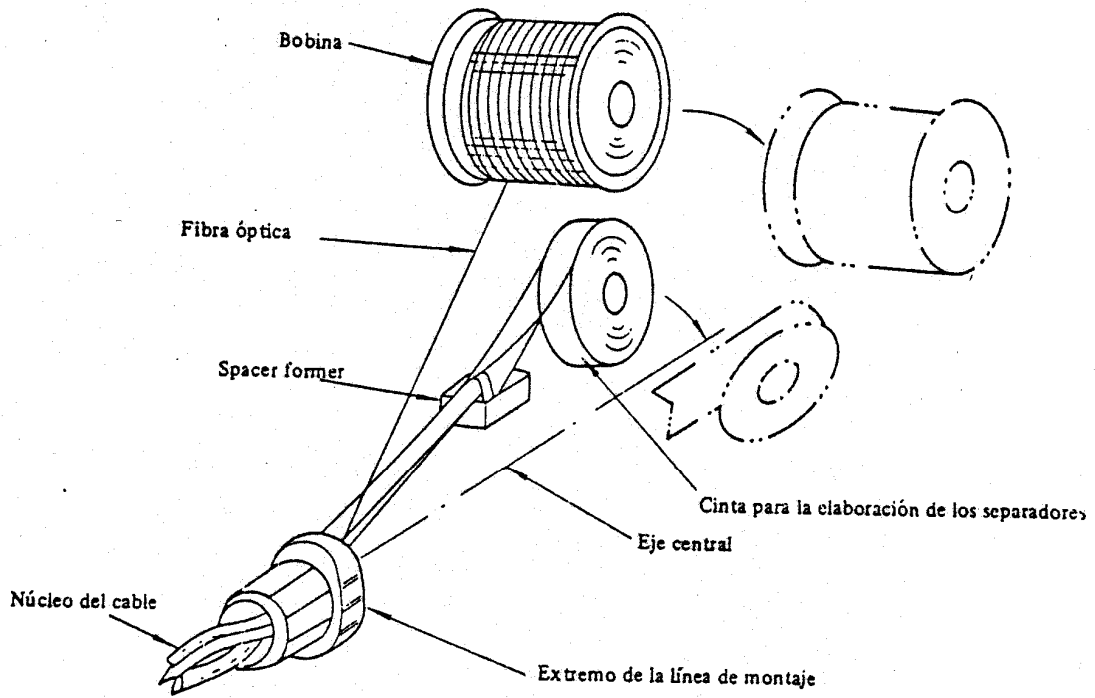


FIGURA 16 - Método de fabricación de cable.

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE PERDIDAS DE LA ENERGÍA DE LA SEÑAL EN UNA FIBRA ÓPTICA.

#### 3.1. PARÁMETROS IMPORTANTES DE UNA FIBRA ÓPTICA.

##### 3.1.1 Conjunto de parámetros más importantes de una fibra óptica.

La propagación de luz en fibras ópticas y las propiedades de acoplamiento difieren mucho en la fibra multimodo y las monomodo. Algunos ejemplos son, la cantidad de modos, la apertura numérica, los diámetros, etc.

Los parámetros importantes que se deben conocer:

- ✓ Atenuación en la fibra óptica.
- ✓ Atenuación en el empalme (s).
- ✓ Atenuación en el conector (es).
- ✓ Longitud de onda de corte.
- ✓ Diámetro del campo modal.
- ✓ Dispersión temporal de la señal.

##### 3.1.2 Atenuación.

Las señales lumínicas que se propagan a través de la fibra óptica experimentan una atenuación, es decir, una pérdida de energía, la cual es un parámetro básico que se debe tener en cuenta en el diseño de sistemas de telecomunicaciones.

La atenuación es debida a la absorción y a la radiación; la absorción es la conversión de la luz en calor en las moléculas de la fibra; la radiación es el paso de

la luz del núcleo al revestimiento. En rigor no son pérdidas porque la energía no se pierde, pero la recuperación de la energía luminosa no es costeable.

Los mecanismos anteriormente mencionados son dependientes de la longitud de onda; por consiguiente una medida de la atenuación como una función de la longitud de onda (pérdida espectral), es a menudo usada para identificar regiones de bajas pérdidas, adecuadas para los sistemas de telecomunicaciones.

Si  $P_1$  y  $P_2$  son las potencias ópticas en dos puntos separados por una distancia  $L$  [Km], podremos calcular la atenuación específica con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \text{Log} \frac{P_1}{P_2} \left[ \frac{dB}{Km} \right] \quad (3.1)$$

La atenuación en los empalmes dependerá básicamente de la técnica usada para efectuar dicho empalme (fusión ó mecánico).

La atenuación en conectores dependerá del tipo de conectores y la marca de este.

### **3.1.3 Longitud de onda de limite de corte.**

Esto se refiere a la longitud de onda más corta, en la cual el modo fundamental, (modo de orden más bajo) de una fibra óptica, es el único capaz de propagarse, o bien una longitud de onda a partir de la cual un modo particular deja de ser guiado.

En fibra óptica monomodo, la longitud de onda límite o de corte, debe ser menor que la longitud de onda de la luz a ser transmitida. En esta fibra interesa conocer la longitud de onda límite o de corte correspondiente al modo de segundo orden.

### 3.1.4 Campo modal.

Esto es producido por los modos que viajan por el revestimiento ( $n_2$ ) de la fibra provocando "halo" lumínico en el núcleo.

### 3.1.5 Dispersión temporal.

La dispersión es un proceso de ensanchamiento de los pulsos que enviamos por la fibra óptica. Este fenómeno es debido a que la velocidad de propagación de la luz en una fibra óptica, es la función de varios factores, pudiendo definirse los siguientes tipos de dispersión:

- ✓ Dispersión de modo
- ✓ Dispersión de material o dispersión cromática.
- ✓ Dispersión de guía de onda

Como consecuencia de la dispersión, los pulsos de luz experimentan un ensanchamiento en su tiempo de recorrido por la fibra óptica. Por lo tanto, la fibra óptica se comporta para las señales a ser transmitidas como un filtro pasobajas.

$$\text{Dispersión} = \frac{\sqrt{t_2^2 - t_1^2}}{L} \left[ \frac{ns}{km} \right] \quad (3.2)$$

$t_1$ : Tiempo inicial de inyección del pulso.

$t_2$ : Tiempo final de pulso.

L: Longitud de fibra óptica.

### 3.2. Medición de Atenuación.

Para la medición de la atenuación se presentan tres métodos:

- ✓ **El método de corte ("cut - back").**
- ✓ **El método de pérdidas de inserción.**

✓ **EL método de retrodispersión.**

**3.2.1 Método de corte.**

EL método de corte es un método preciso de medición de la pérdida de señal usado en la fibra óptica. Aunque este método es muy exacto, la desventaja es su naturaleza destructiva; esto es, la fibra es cortada.

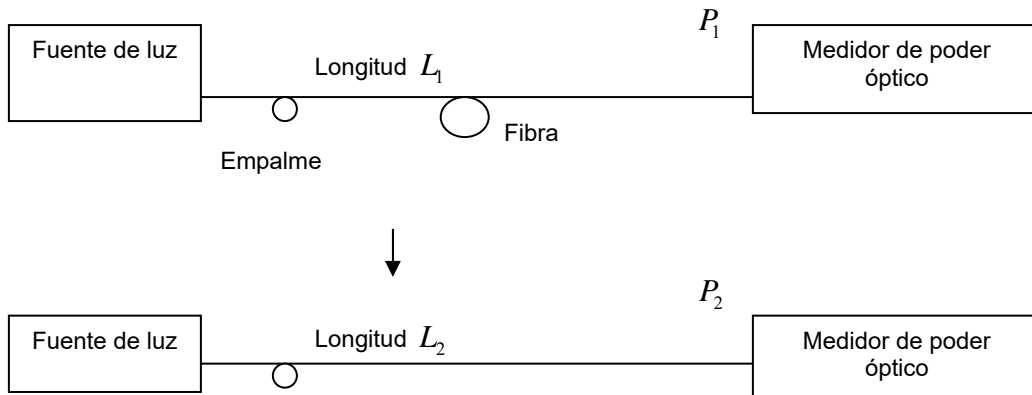


Figura 17. Método de corte

Este método se muestra en la figura 17. Primero se mide la potencia recibida con la longitud  $L_1$  y luego con la longitud  $L_2$ , la atenuación  $\alpha$  es calculada con las potencias  $P_1$  y  $P_2$  obtenidas con un medidor de poder óptico.

$$\alpha = \frac{10}{[L_1 - L_2]} \text{Log}_{10} \left[ \frac{P_2}{P_1} \right] \left[ \frac{dB}{Km} \right] \quad (3.3)$$

Donde  $L_2$  es la longitud restante de la fibra corta después del corte. Cuando la potencia óptica es medida en decibeles referidos a  $1mW(dBm)$ , la atenuación es

simplemente 
$$\alpha = \frac{[P_2 - P_1]}{[L_1 - L_2]}$$

Dado que la pérdida de una fibra con corta longitud es muy pequeña, es ignorada. Debemos tener en cuenta de no cambiar la condición de entrada (condiciones de inicio), antes y después del corte de la fibra. La razón para cortar la fibra es que la capacidad de acoplamiento de una luz de origen dentro de una fibra o un elemento, no es constante, y la capacidad de entrada debe medirse usando la fibra de pequeño corte. Aunque el método de corte es muy exacto, hay algunos errores de medición. Los principales orígenes de errores son un cambio de la condición de entrada, el efecto del modo del revestimiento, un mal corte en el extremo final de la fibra, y la no-uniformidad de la foto-sensibilidad de la superficie del foto detector usado en el medidor. El modo de revestimiento se atenúa fuertemente y existe cerca de la entrada. Para suprimir el error del efecto del modo del revestimiento, el modo de revestimiento debe ser removido usando un aceite igualador del índice de refracción. La exactitud del método de corte es generalmente  $\pm 0.03$  dB. Cuando se requiere de una mayor exactitud, obtenemos el valor promedio de varias mediciones de atenuación.

### **3.2.2 Método de pérdidas de inserción.**

Para medir las pérdidas por este método, se conecta la fuente de luz a la fibra a medir y se mide la potencia obtenida al extremo final de esta (figura 18).

En seguida se retira la fibra y se instala en su lugar un “componente óptico pasivo” que es en realidad un atenuador variable calibrado en dB (figura 19).

Se acciona el control de atenuación del atenuador, hasta que el medidor de poder indica que la potencia recibida es la misma que cuando estaba la fibra. En este momento el atenuador nos indica cual es la pérdida de la fibra.

Un detalle interesante es que siempre se debe conectar a la fuente de luz un tramo de fibra de 2 o 3 metros de longitud cuando menos.

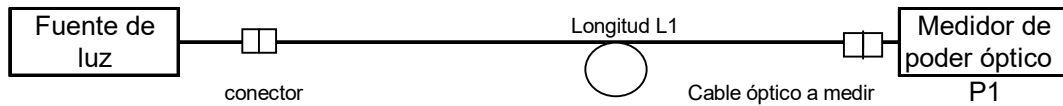


FIGURA 18

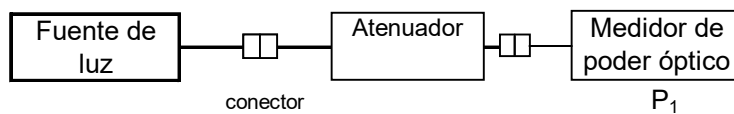


FIGURA 19

Estos métodos tienen errores inherentes a los conectores, ya que en estos se tiene un alto porcentaje de la pérdida total, de modo que al cortar la fibra (en el primer método), o al sustituirla con el atenuador (en el segundo método), se están introduciendo los errores mencionados.

Es pues necesario, asegurarse de que todos los conectores sean de calidad óptima y descontar su pérdida de la calculada con los métodos explicados.

Es posible modificar el método de inserción usando una conexión óptica como se muestra en la figura 20. Cuando la razón de acoplamiento  $K$  es conocida, la atenuación o pérdida es obtenida midiendo  $P_1$  y  $P_2$ . Entonces la pérdida es expresada como:

$$\alpha = 10 \text{Log}_{10} \left[ k \frac{P_2}{P_1} \right] \quad [dB] \quad (3.5)$$

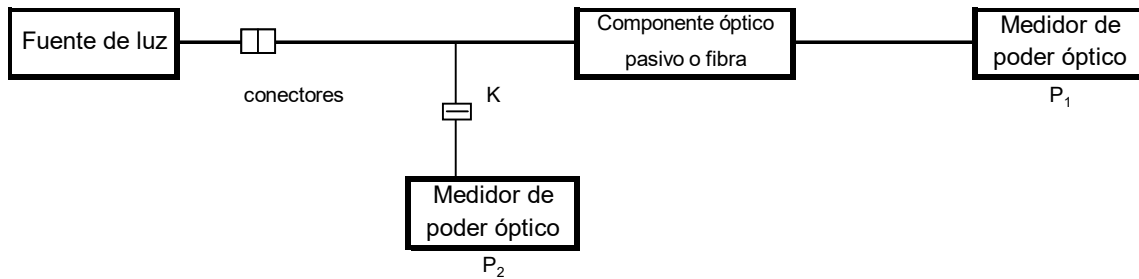


Figura 20. Modificación del Método de Inserción.

$P_1$  y  $P_2$  pueden ser medidos simultáneamente cuando se usan dos medidores de poder. Este método es especialmente apropiado para medir las pérdidas en un largo periodo, como es en la prueba de confiabilidad de los componentes, porque la potencia de la fuente de luz generalmente no es constante durante un largo periodo y el monitoreo de la potencia de la fuente de luz siempre es posible con este método.

Varias fuentes de luz son usadas tanto para el método de corte, como para el método de inserción; entre ellas tenemos: las lámparas de halógeno, los LED y los diodos láser. La atenuación es usualmente medida en un pequeño rango del espectro y es expresada como  $\alpha$  a la longitud de onda  $\lambda$ . Por lo tanto, una lámpara de halógeno con un monocromador, o una lámpara de halógeno con un filtro óptico, es usada como fuente de luz. Para una medición estable, la luz de una lámpara de halógeno esta modulada en forma de un tren de pulsos rectangulares. Un rango dinámico ancho es realizado cuando se usa un LED o un diodo láser, especialmente este ultimo. Una medición estable es realizada con el uso de un LED o un diodo láser con control de temperatura.



En el caso de medición de atenuación en fibras multimodo, se debe tener especial cuidado con respecto al modo de excitación de la fibra. La excitación en estado estable es comúnmente usada para medir la atenuación en una fibra multimodo, o un componente empleado para sistemas de transmisión que use fibras multimodo, porque este asegura la alta reproductividad de las mediciones. Estrictamente hablando, la distribución de potencia en el modo de estado estable, es diferente para las diversas fibras, y por lo tanto no es posible ser realizado, pero se puede lograr una aproximación buena utilizando fibras largas o dispositivos "mezcladores" de modos (Mode Scramblers). Puesto que el modo de estado estable de distribución de potencia óptica es realizado por una fibra larga, una fibra con una longitud relativamente larga, 2 a 3 km, enrollada sobre un carrete con un diámetro de aproximadamente 10 cm, es usada como una fibra falsa. Un modo de "mezcla de modos" es logrado al poner la fibra en forma torcida, de unos 2 o 3 cm de largo o por empalmar una fibra corta con diferentes tipos de fibra multimodo, como las fibras SI y GI. El dispositivo que produce el estado estable de distribución de potencia óptica, está inserto entre la fuente de luz y la muestra medida, (una fibra o un componente).

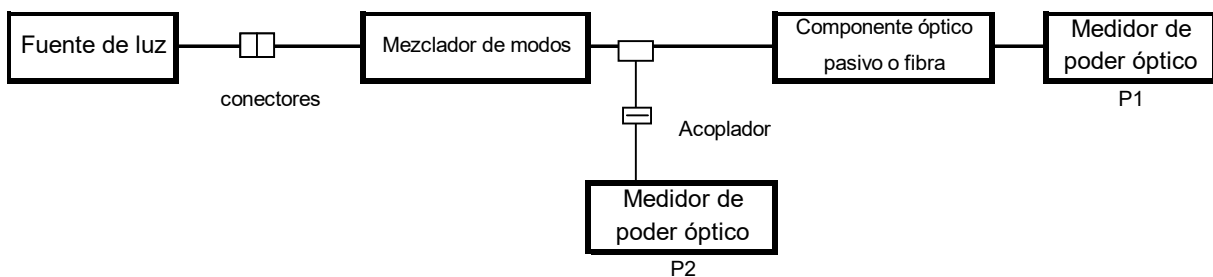


Figura 21. Medición de pérdidas para una fibra multimodo o un componente

### 3.2.3 Método de retrodispersión.

El método de retrodispersión es muy útil, dado que hace posible determinar las pérdidas de una fibra y un componente en el ámbito local y sin destrucción. También es útil para la detección y ubicación de fallas. Esta información (pérdida y ubicación de fallas), puede obtenerse desde un extremo de la fibra; es decir, obtenemos esta información remotamente. El monitoreo en línea es posible con el método de retrodispersión, con longitudes de onda diferentes a la longitud de onda de la señal de transmisión, en sistemas de transmisión por fibra. El inconveniente de este método es que tiene menos precisión que el método de inserción.

El método de retrodispersión hace uso de la luz que regresa desde el final hasta el extremo de entrada de la fibra. Los orígenes de la dispersión son la dispersión Rayleigh y la reflexión de Fresnel. La dispersión Rayleigh es una de las principales causas de pérdidas en la fibra. Algunas partes de la luz dispersa se propagan hacia atrás. También se propaga hacia atrás la luz que llega al extremo final de la fibra y no es absorbida. Esta energía reflejada depende de varios factores, tales como el dispositivo o componente conectado al final y el tipo de corte o rompimiento que tenga la fibra. La energía reflejada de un punto de rompimiento de fibra es menor al 4% y depende de la forma de ruptura de fibra.

La energía retrodispersada mediante la retrodispersión Rayleigh se da como

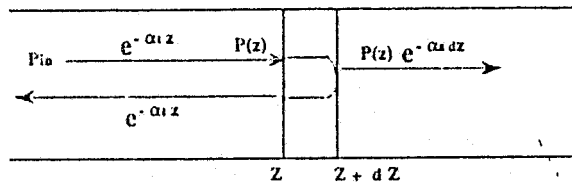
$$P_B = \frac{S \propto_s v_g W}{2} e^{-2\alpha_s L} P_{in} \quad (3.6)$$

donde  $S, \alpha_s, \alpha_t, v_g, W, L,$  y  $P_{in}$  son el factor de retrodispersión, pérdida de retrodispersión Rayleigh, pérdida total, velocidad de grupo, ancho de pulso óptico en tiempo, longitud de fibra, y potencia de entrada respectivamente. La pérdida total  $\alpha_1$  es una suma de la pérdida de retrodispersión Rayleigh y de la pérdida de absorción. La derivación de (3.6) es mostrada abajo usando la figura 22. La potencia dispersada  $dP_B(z)$  desde la longitud infinitesimal de la fibra  $dz$  (localizada entre  $z$  y  $z + dz$ ) es:

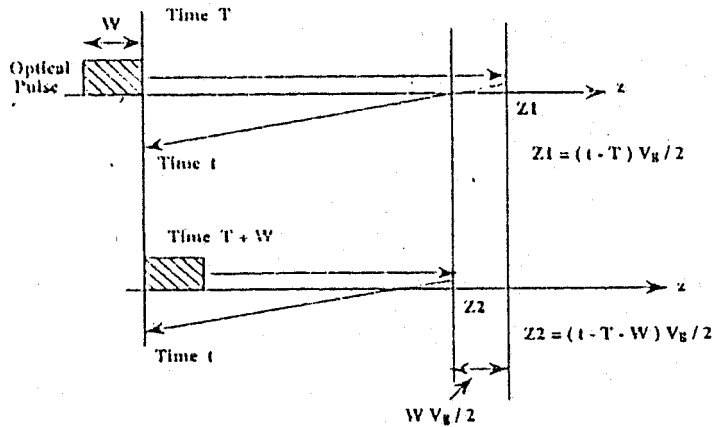
$$dP_B(z) = SdP_s(z) \quad (3.7)$$

donde  $S$  esta definida como la emisión de potencia de dispersión inversa de Rayleigh, a la potencia de dispersión de Rayleigh. La potencia de dispersión de Rayleigh desde  $dz$  es:

$$dP_s(z) = P(z) - P(z)e^{-\alpha_s dz} \quad dz \approx P(z) \alpha_s dz \quad (3.8)$$



(a)



(b)

Figura 22. Derivación de la potencia de retrodispersión

y la siguiente ecuación es obtenida al combinar (3.7) y (3.8):

$$dP_B(z) = SP(z) \alpha_s dz \quad (3.9)$$

Donde esta potencia retrodispersada en la entrada de la fibra es observada, la potencia se atenúa con  $\exp(-\alpha_t z)$  es decir:

$$dP_B(z) = SP(z) \alpha_s e^{-\alpha_t z} dz = S \alpha_s e^{-2\alpha_t z} P_{in} dz \quad (3.10)$$

donde la relación de  $P(z) = P_{in} e^{-\alpha_s z}$  es usada. El tiempo de regreso  $t$  desde la ubicación de  $z$  al extremo final de la entrada de la fibra esta expresada como:

$$t = \frac{2z}{v_g} \quad (3.11)$$

La potencia retrodispersada en el tiempo  $t$  es entonces obtenida como sigue:

$$P_B(t) = \frac{S \alpha_s v_g P_{in}}{2} \int_{tr}^{tr+w} e^{-\alpha_r v_g t} dt \approx \left[ \frac{S \alpha_s v_g W P_{in}}{2} \right] e^{-\alpha_r v_g t_r} \quad (3.12)$$

Esta ecuación es reescrita al usar el tiempo de ida y vuelta  $t_r = \frac{2L}{v_g}$  y obtenemos

(3.6). Como es indicado en la figura 22, la retrodispersión de la luz entre  $z$  y  $z + \Delta z$  no puede ser distinguida y la luz sobresaliente es integrada en (3.12). La resolución espacial  $\Delta z$  es dada como:

$$\Delta z = z_1 - z_2 = W \frac{v_g}{2} \quad (3.13)$$

Un ejemplo del espacio de resolución  $\Delta z$  es 100 m por  $W = 1 \mu s$  y  $v_g = 2 \times 10^8$  m.

El factor de retrodispersión  $S$  esta dado por:

$$S = \frac{3}{8} \frac{n_0^2 - n_2^2}{n_0^2} \quad (\text{SI fibra multimodo}) \quad (3.14)$$

$$S = \frac{1}{4} \frac{n_0^2 - n_2^2}{n_0^2} \quad (\text{GI fibra multimodo}) \quad (3.15)$$

$$S = \frac{3}{2} \frac{a^2}{w^2 v^2} \frac{n_0^2 - n_2^2}{n_0^2} \quad (\text{fibra monomodo}) \quad (3.16)$$

y estas son aproximadamente expresadas como:

$$S = C_r \frac{n_0^2 - n_2^2}{n_0^2} \approx 2C_r \Delta \quad (3.17)$$

donde  $C_r$  es una constante en el rango de 0.2 a 0.4 dependiendo del tipo de fibra (SI multimodo, GI multimodo, y fibra monomodo) y  $\Delta$  es la diferencia relativa del índice. Al combinar (3.6) y (3.17) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{P_B}{P_{in}} = \alpha_s v_g W C_r \Delta e^{-2\alpha_s L} \quad (3.18)$$

Dado que  $\Delta$  para una fibra de forma sencilla es casi un quinto que para una fibra multimodo la potencia de retrodispersión de una fibra de modo único es menor que la de fibra multimodo por un factor casi un quinto para la misma potencia de entrada. El ejemplo de  $\alpha_s v_g W C_r \Delta$  es  $6.8 \times 10^{-6}$  (alrededor  $-52 \text{ dB}$ ) para  $\alpha_s = 0.3 \frac{\text{dB}}{\text{Km}}$ ,  $v_g = 2 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $W = 1 \mu\text{s}$ , y  $C_r \Delta = 5 \times 10^{-4}$  (fibra monomodo). Este valor es alrededor de  $38 \text{ dB}$  más bajo cuando es comparado con la reflexión de Fresnel (alrededor de  $-14 \text{ dB}$ ).

Un aparato usado en el método de retrodispersión es llamado OTDR, (Optical Time Domain Reflectometer) mide la retrodispersión en el dominio del tiempo. El diagrama de bloque de un OTDR es mostrado en la figura 23, donde un acoplador de fibra, es usado para obtener un acoplamiento direccional. En lugar de un acoplador de fibra, puede usarse también un medio espejo, un divisor de polarización, o un deflector de luz óptico acústico (AO). De todos estos, el deflector de luz AO tiene características superiores, tal como la baja pérdida de inserción, buena ejecución y baja dependencia de la polarización, lo cual es conveniente para un OTDR de fibra monomodo.

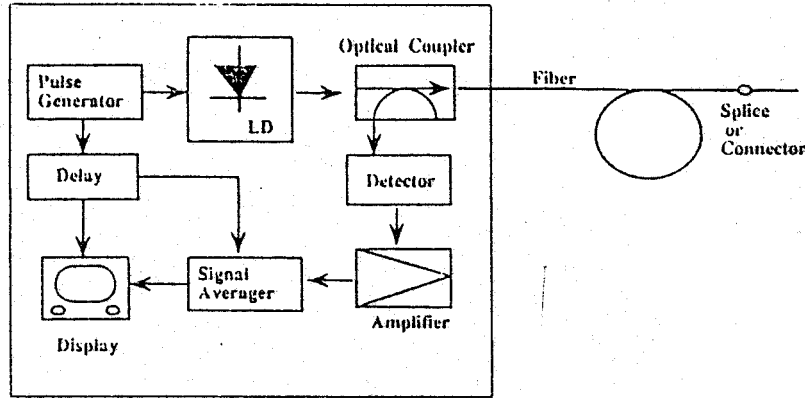


FIGURA 23. OTDR (Bloque del diagrama del equipo)

Por cada pulso de luz emitido se hace una medición y se envía a un circuito promediador, con lo cual se minimizan los efectos del ruido, obteniendo una medición con alta SNR, ya que el ruido es aleatorio, y al hacer N mediciones, la potencia de ruido se incrementa por N, mientras la potencia de la señal se incrementa por  $N^2$ . La SNR incrementa en proporción a N, al promediar N lecturas. Para una precisa medición, un gran número de lecturas es inevitable, lo que requiere un largo tiempo de medición. En un esfuerzo para ensanchar el rango dinámico de un OTDR, se han hecho varios mejoramientos tales como una detección coherente, detección por cuenta de fotones, el uso de amplificadores de diodo laser, etc.

Usando la ecuación 3.18 para  $z_1 = L_1$  y  $z_2 = L_2 (L_2 > L_1)$  es expresada:

$$\text{Log}_e \left[ \frac{P_B L_1}{P_B L_2} \right] = 2 \alpha (L_2 - L_1) \quad (3.19)$$

y ésta expresa la relación lineal entre la potencia de retrodispersión en un logaritmo y la longitud de la fibra. La pérdida de fibra  $\alpha_t$  es medida como una función de la longitud de la fibra, como se muestra en la figura 24. Cuando un componente óptico pasivo, tal como un conector, con una pérdida de  $\alpha_t$ , existe entre

$z = L_1$  y  $z = L_2$  en el punto  $\Delta$ , la razón de la potencia de retrodispersión es:

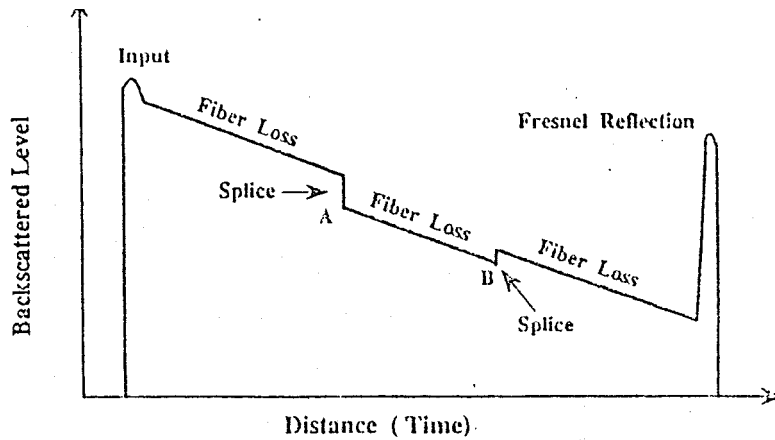
$$\text{Log}_e \left[ \frac{P_B L_1}{P_B L_2} \right] \approx \text{Log}_e \left[ \frac{\alpha_{s1} C_{r1} \Delta_1}{\alpha_{s2} C_{r2} \Delta_2} \right] + 2 \alpha_c \quad (3.20)$$

donde la diferencia de longitud  $L_1 - L_2$  se asume que es pequeña ( la pérdida de la fibra en esta porción es pequeña). Cuando las fibras de entrada y salida de un componente óptico pasivo son idénticas (3.20) es  $2 \alpha_c$ . En este caso, la diferencia de potencia en la figura 24 corresponde directamente a la pérdida del componente.

Para el caso especial que  $\left[ \frac{\alpha_{s1} C_{r1} \Delta_1}{\alpha_{s2} C_{r2} \Delta_2} \right] < 1$  y  $\alpha_c \ll 1$ ,

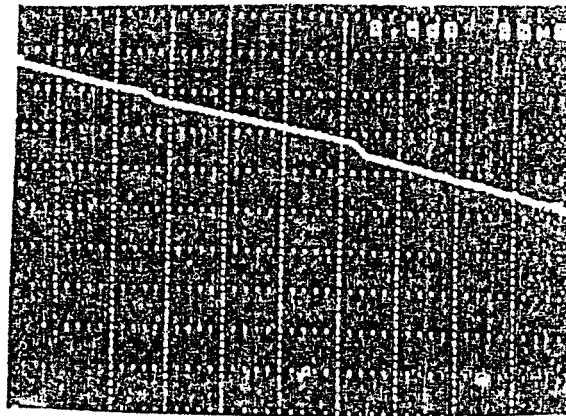
algunas veces se vuelve mínimo, se muestra en el punto B en la figura 24.





(a)

Figure 4.10 Trace by OTDR: (a) schematic trace; (b) measured trace.



(b)

Figura 24. Señal por un OTDR

En esencia la gráfica proporcionada por el OTDR, muestra como varia la potencia (en dB) de la luz a lo largo de la fibra. En el caso ideal esta gráfica es una recta decreciente, pero los conectores producen descensos en forma de escalón y las irregularidades de la fibra producen “arrugas” en la gráfica.

Si se empalman dos fibras de diferentes características, la curva obtenida tendrá dos porciones de diferentes pendientes. Si hay una rotura en la fibra, la curva se cae verticalmente y ahí termina. Dado que el eje horizontal está en metros o kilómetros y el eje vertical en decibeles, podremos con facilidad determinar la pérdida en dB/km.

## CAPITULO IV

### DESAROLLO DE LA PROPUESTA SOBRE EL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN DE LA SEÑAL EN UNA FIBRA ÓPTICA, UTILIZANDO EL MÉTODO DE CORTE.

#### 4.1. Elaboración de la estructura del sistema de medición de la atenuación de la señal en una fibra óptica.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior (Capítulo III) la función del sistema de medición, consiste en la determinación de las pérdidas en las fibras ópticas.

Es uno de los métodos usados para la determinación de la atenuación, se requiere la medición de las intensidades de la radiación óptica en los puertos de entrada y de salida de la fibra óptica. Considerando lo expuesto, el sistema de medición tiene que implementar mediciones de las intensidades para aplicar la fórmula:

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \text{Log}_{10} \frac{P_2}{P_1} \left[ \frac{dB}{m} \right]$$

El esquema del sistema que permite realizar las mediciones se presenta en la figura 25. La fuente de luz (1) sirve para emitir la luz de prueba en el rango de longitudes de onda de interés. Hay dos variantes principales para la realización de las mediciones. En general, cualquiera fibra óptica debe ser caracterizada en un rango de longitudes de onda según su aplicación asignada. Considerando que las líneas de comunicación óptica trabajan en el rango espectral de  $\lambda = 820 \text{ nm}$  a  $1550 \text{ nm}$ , es muy deseable caracterizar la fibra óptica en este rango de longitud de onda. Para este caso, una fuente puede ser un foco acoplado a un monocromador que

trabaja en el rango de longitudes de onda esperado. La alternativa consiste en el uso de un láser para cada ventana de transmisión, con el rango de sintonización al rededor de  $80 \text{ nm}$  cerca de su línea central de emisión. Esta solución se utiliza para la caracterización de la fibra óptica en una ventana de transmisión particular de la fibra óptica, por ejemplo en la ventana de  $\lambda = 1310 \text{ nm}$ .

Dependiendo del tipo de fuente de luz, existen dos opciones: la luz polarizada o no polarizada. En la primer variante, se utiliza una fuente no polarizada de luz: ejemplo diodo emisor de luz (LED).

La segunda variante consiste en utilizar una fuente de polarización lineal, por ejemplo un láser.

El dispositivo de acoplamiento óptico (2) sirve para el enfoque de la luz de la fuente al núcleo de la fibra óptica (5) dentro de los límites de apertura lineal y angular.

El dispositivo(3) es un mezclador de modos estándar de excitación de la fibra óptica (5) que está bajo prueba.

En los puntos de excitación, la estructura modal de la luz que se propaga en la fibra óptica depende de las características particulares de las fuentes de luz y de las características de acoplamiento incluyendo las características geométricas de los dispositivos acopladores. Existe la probabilidad de que una parte de la energía total de la fuente se inyecte en la fibra óptica en forma de los modos del revestimiento o de espacio. Los modos de espacio salen de la fibra óptica en distancias relativamente cortas; los modos del revestimiento a veces se propagan a distancias más grandes dependiendo de sus características de propagación y de la

absorción óptica del material de la tercera capa de la fibra óptica encima del revestimiento (forro-plástico). La energía ligada a los modos de espacio y del revestimiento puede alterar las mediciones; por esta razón es muy importante asegurar que prácticamente no existan niveles detectables de estos modos en la fibra óptica o dispositivos de baja prueba. El método más práctico para alcanzar esta condición, usa un dispositivo (4) eliminador de modos del revestimiento, que es un tanque(vaso) con un fluido de índice de refracción igual al del revestimiento de la fibra; dentro de este vaso, de la fibra se quita el revestimiento plástico.

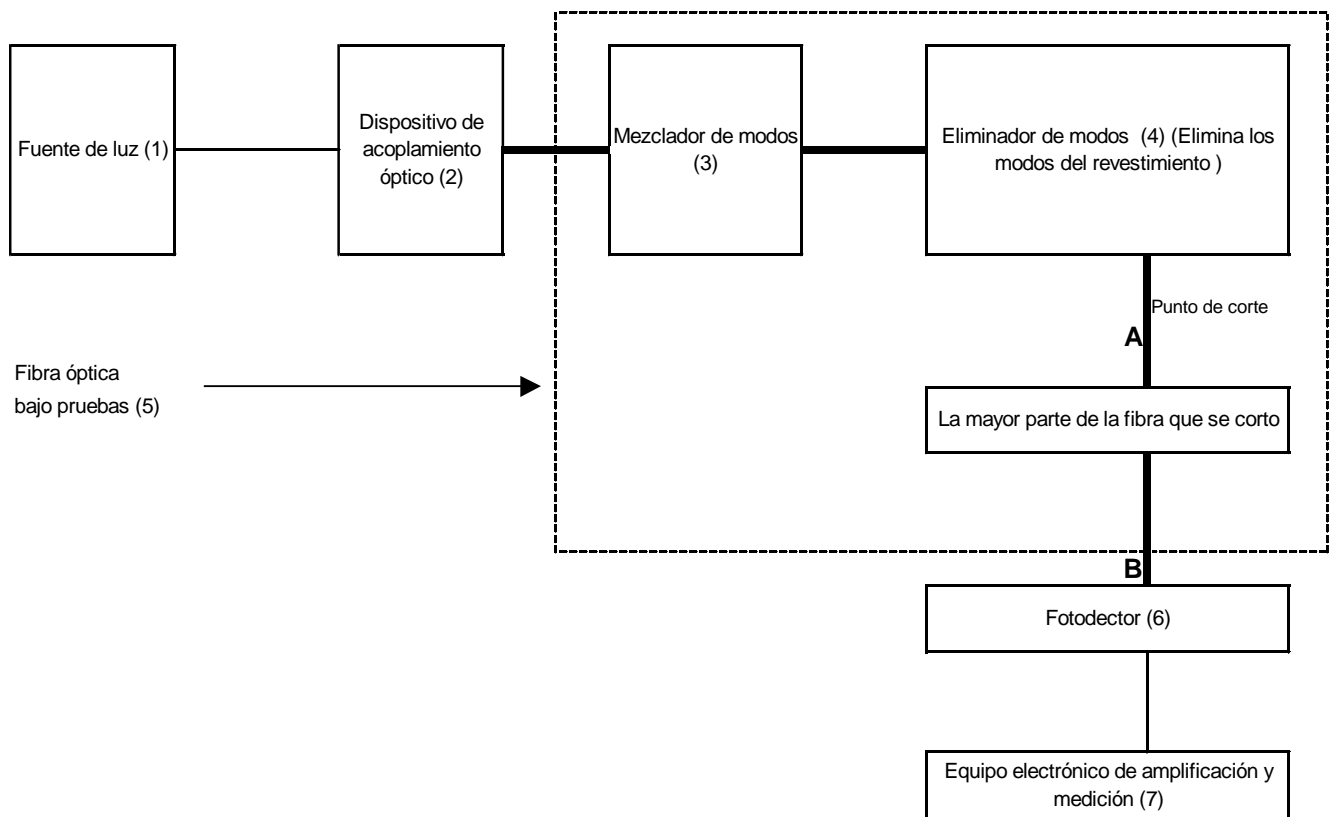


FIGURA 25 - Método de corte, esquema básico del sistema de medición de la atenuación de una fibra óptica.

Primeramente se mide la potencia de salida de la fibra óptica bajo prueba (5) en el punto B, después del corte se mide la potencia de salida del resto de la fibra bajo prueba en el punto A.

**4.2. Elaboración de propuestas particulares sobre la implementación de algunos subsistemas y unidades del sistema de medición de la atenuación de la señal en una fibra óptica.**

Con el método de corte, empleando un atenuador óptico calibrado, es posible llevar a cabo una medición más precisa, como se ilustra en la figura número 26 que se presenta a continuación.

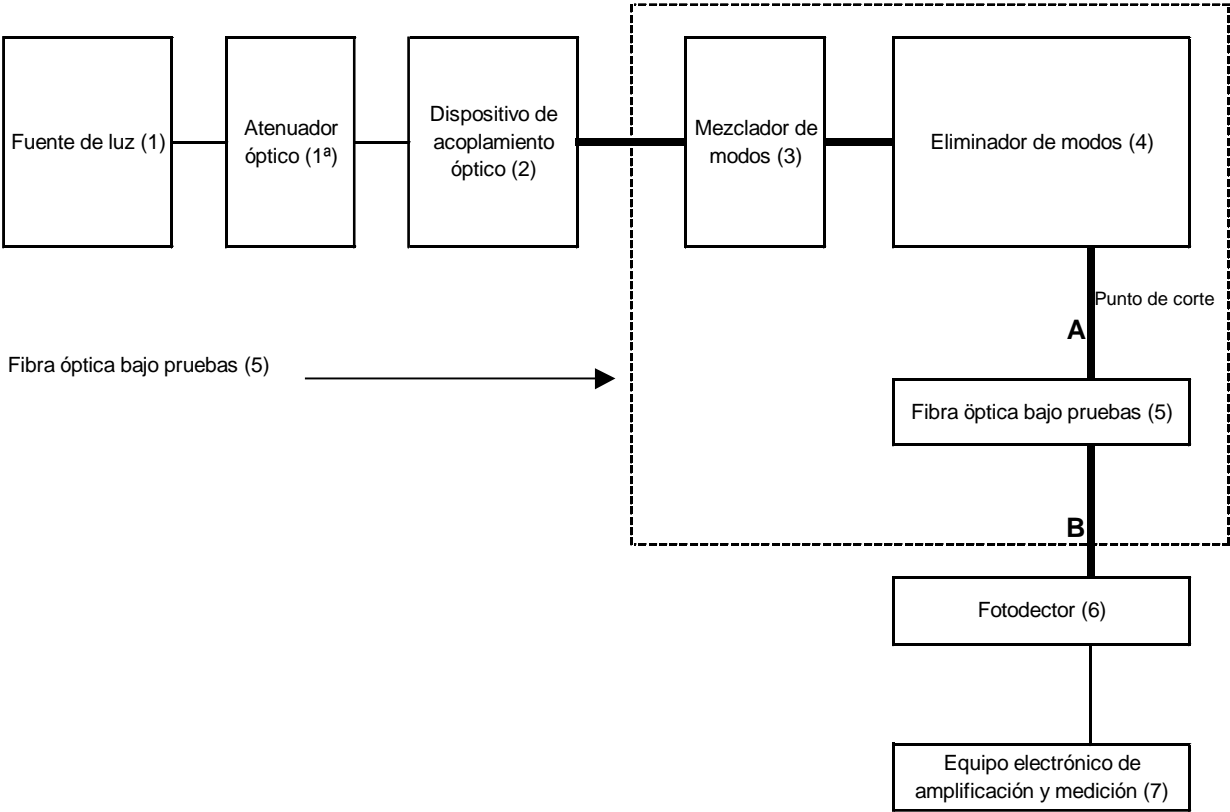


FIGURA 26 - Método de corte, esquema de medición más preciso de la atenuación de una fibra óptica, utilizando un atenuador óptico calibrado.

Fuente de luz: La primera consideración que tenemos que tomar en cuenta sobre la fuente de luz (1), es el costo de las fuentes de diferentes tipos. Por esta razón, se considera razonable utilizar fuentes con monocromadores, solamente si en realidad existe una necesidad importante de caracterizar la atenuación en un rango de longitudes de onda grande y continuo. En caso de que sea suficiente caracterizar una fibra en un rango de longitudes de onda angosta, el uso de un láser sintonizado puede resultar una solución mucho más económica.

Considerando que nuestro objetivo principal es el desarrollo de un experimento docente, se puede realizar la caracterización de la fibra óptica en una longitud de onda fija; para esto, se puede utilizar un láser semiconductor relativamente sencillo y económico. En caso de necesitar la caracterización en otra ventana de transmisión; se puede utilizar otro láser de longitud de onda fija que funcione en esta ventana de transmisión.

El láser para la fuente (1) debe ser un láser que se acople efectivamente a una fibra óptica. Considerando la dificultad de manejar las fibras de monomodo, para un laboratorio docente, es mejor realizar practicas sobre fibras multimodo. Esto significa que el láser puede ser un láser multimodo.

En lo que se refiere a la longitud de onda del láser, esta decisión hay que relacionarla a las demás características de este elemento.

En el mercado existe un rango grande de modelos de láser semiconductores para todas las ventanas de transmisión de fibras ópticas y posteriormente se proporcionaran recomendaciones sobre los tipos particulares de láser para las ventanas de transmisión de  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $1310 \text{ nm}$ ,  $860 \text{ nm}$ , además, para

longitudes de onda de  $680\text{ nm}$  y  $630\text{ nm}$ . Estas últimas longitudes de onda son utilizadas en algunos instrumentos y sensores ópticos; por esta razón se considera la necesidad de caracterizar las fibras ópticas a estas longitudes de ondas.

La potencia de la fuente láser debe ser grande para facilitar la medición de los pequeños valores que son del orden de  $-60\text{ dB}$  como límite. Para longitudes de onda  $\lambda = 1550\text{ nm}$  y  $1310\text{ nm}$  la potencia de láseres semiconductores comerciales tienen su límite; ese límite es del orden de  $100\text{ mWatt}$  para  $\lambda = 1550\text{ nm}$  y  $500\text{ mWatt}$  para  $\lambda = 1310\text{ nm}$ . Este límite está relacionado a las limitaciones físicas de la naturaleza cuántica de la generación de la luz de longitud de onda larga en materiales semiconductores. Por estos problemas los materiales semiconductores empleados en láseres son compuestos de tres o de cuatro elementos como  $\text{GaAlAs}$ ,  $\text{GaInAlAs}$  etc.

Para longitudes de onda más corta; por ejemplo  $\lambda = 850\text{-}860\text{ nm}$  hay modelos de láseres de  $\text{GaAlAs}$  con la eficiencia cuántica muy grande; para esta longitud de onda podemos utilizar un láser de algunos  $\text{m Watts}$ . Un láser particular que podemos proponer es marca EG&G Electronics modelo C86098E-13. Esto es MOCVD diodo láser de  $\lambda = 850\text{ nm}$  de operación pulsada de  $250\text{ mWatt}$  pico. Este láser tiene la facilidad de integración interna con una terminación de fibra óptica, incluyendo la fibra monomodo de  $4\text{-}6\text{ }\mu\text{m}$  de diámetro del núcleo o multimodo de  $50\text{ }\mu\text{m}$  de diámetro de núcleo.

Para las ondas más cortas ( $\lambda = 630 - 680\text{ }\mu\text{m}$ ), el nivel de potencia de modelos existentes de láseres semiconductores disminuye por varias razones físicas y una vez más hay límites prácticos de los niveles de potencia de láseres comerciales.



Los valores de potencia de láseres típicos son del orden de unos *mWatts*. Estas longitudes de onda que no se utilizan para comunicaciones ópticas; por esta razón, en el mercado no existen láseres diseñados para el acoplamiento con las fibras ópticas. Los modelos existentes tienen otras aplicaciones; por eso, su área emisora y la divergencia del rayo son grandes. Por esta razón, el acoplamiento con una fibra óptica es difícil y la eficiencia del acoplamiento es muy baja.

Un láser particular que proponemos para la longitud de onda  $\lambda = 680 \text{ nm}$  es el dispositivo marca Philips modelo CQL802D, de *100 mWatts CW*.

Para longitudes de onda  $\lambda = 780 \text{ nm}$  se propone el diodo láser de modo único marca Sharp modelo LT025MD, de *40 mWatt CW*.

El modo de operación del láser es pulsado, para facilitar las mediciones. La ventaja consiste en la posibilidad de realizar las mediciones en el dominio de la corriente alterna, lo que permite evitar problemas de procesamiento complejo de la señal débil.

Para longitud de onda  $\lambda = 1310 \text{ nm}$  podemos proponer el dispositivo marca OCI modelo OL303A-100 InGaAsP/InP diodo láser de operación pulsada de *100 mWatt* de modo transversal único (fundamental).

Otra propuesta para la fuente de luz de  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , consiste en el uso de láseres que tiene integrados su fuente de alimentación, moduladores y circuitos de estabilización y monitoreo de potencia óptica de salida. Un módulo de este tipo que podemos recomendar para la presente aplicación es el modelo Hitachi marca LB7671. Este módulo está acoplado con la terminación de la fibra óptica monomodo de  $10 \mu\text{m}$  de diámetro. La potencia típica en el núcleo de la fibra óptica es de *1-2*

*mWatt*. El módulo tiene un modulador de intensidad de luz. Funciona hasta las frecuencias de modulación de 5 GHz, lo que permite el uso de este módulo para otras aplicaciones de laboratorio. En particular, para la caracterización de la dispersión temporal en líneas de comunicación en fibras ópticas.

Los fotodetectores y equipos de medición de la intensidad de la luz: EL fotodetector con sus equipos de la medición de intensidad de luz sirve para medida de la intensidad de la luz que sale de la fibra óptica. La diferencia principal entre los dos medidores que necesitamos para la instalación de laboratorio, consiste en los diferentes niveles de potencia que tienen que medir estos dispositivos.

Los fotodetectores con sus equipos tienen que medir potencias relativamente grandes de entrada, del orden de la potencia de la fuente (1) de luz del sistema de medición, estos valores de potencia son del orden de  $-40dBm \approx 0.1\mu w$ .

El dispositivo fotoreceptor propuesto y recomendable para la presente aplicación es de marca Thor Labs. El modelo PDA50 es un fotodetector PIN de Si, con preamplificador integrado de 10 MHz de ancho de banda y de amplificación variable de  $2 \times 10^4 - 2 \times 10^6 \frac{V}{A}$ , el rango espectral de operación es  $\lambda = 400-1100nm$ , la ampliación de este modulo es de  $2 \times 10^3 \frac{V}{A}$ . Estos dos fotodetectores sirven para la unidad (5) del sistema de medición.

En caso de señales muy débiles de salida, recomendamos el uso de un fotoreceptor similar pero en conjunto con un amplificador de tipo "lock-in" que permite la amplificación de las señales muy débiles por medio del proceso que se llama la detección síncrona. Los dispositivos propuestos y particularmente recomendables

son de la misma marca Thor Labs, el amplificador lock-in modelo LIA100 y el interruptor óptico del haz (chopper) marca MC100, este dispositivo sirve para la realización de una modulación (interrupción) síncrona de luz bajo medición.

Los equipos complementarios necesarios para estas mediciones son instrumentos electrónicos más comunes, tales como un osciloscopio, generador de señales eléctricas, etc. Obviamente, para la mejor operación del sistema de medición es muy deseable utilizar también un sistema digital computarizado de adquisición y procesamiento de datos obtenidos.

Se puede recomendar el standard y equipos GPIB ( General Porpuse Interface Bus) que producen varias compañías, ejemplo: National Instruments.

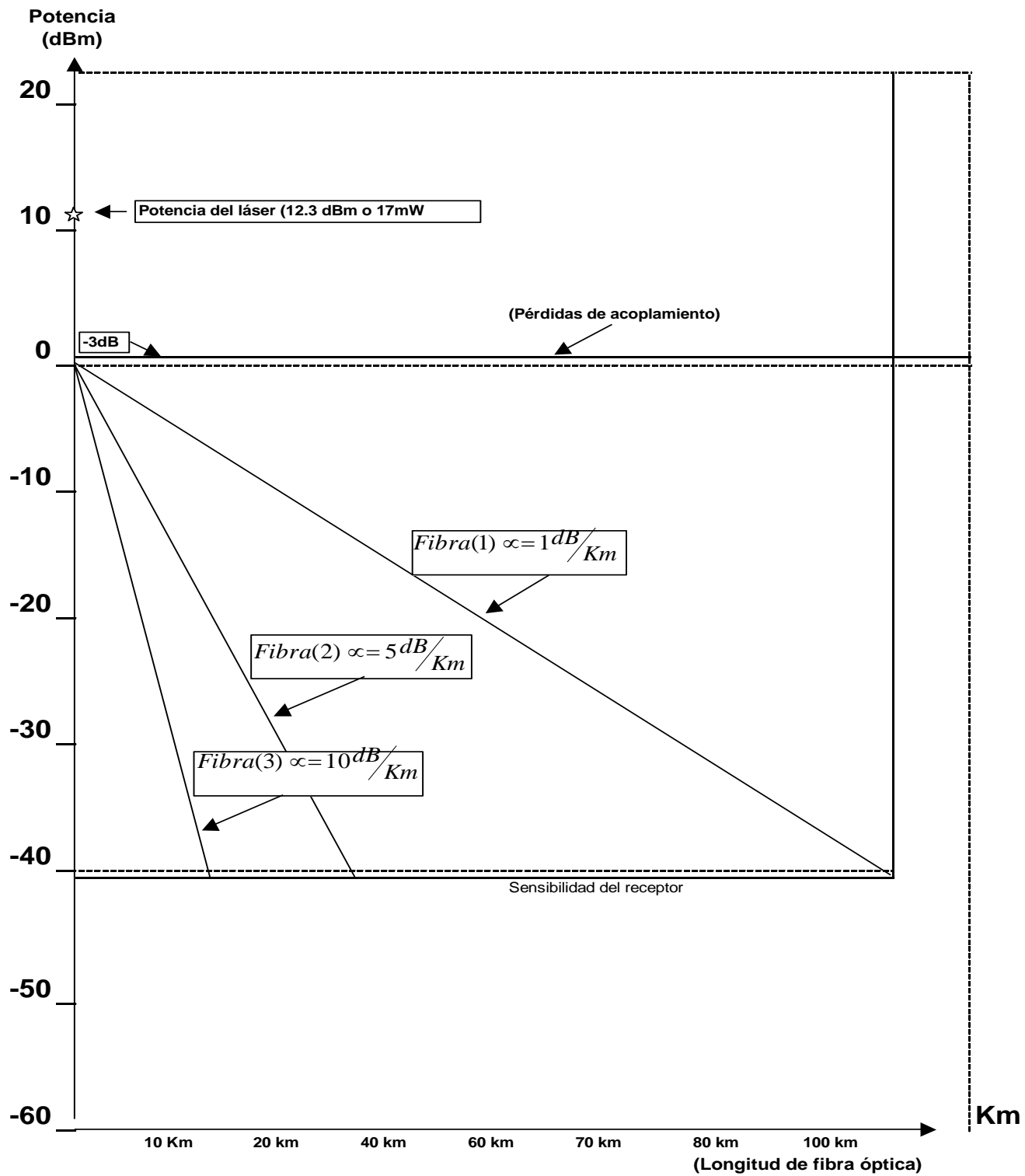
## CÁLCULO DEL BALANCE DE POTENCIA EN EL SISTEMA DE MEDICIÓN PROPUESTA.

1) El láser nos da 17 *mWatts*, que corresponden a 12.4 *dBm*

$$\left[ \frac{N}{dB} \right] = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{17mWatt}{1mWatt} = 10 \times 1.3 = \log_{10} 17 = 12.3 (dBm)$$

2) Hay pérdidas de acoplamiento entre láser y fibra (estimación 50% se pierde → 3 *dB*)

$$\left( \frac{N}{dB} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log_2 = 10 \times 0.3 = 3 (dB) \right) \quad [\text{Razón: 2 veces} \rightarrow 3dB]$$



- Atenuación de la fibra**  
 (1) 1db/km  
 (2) 5db/km  
 (3) 10 db/km

**Cálculo del balance de potencia (Power Budget) del sistema de medición**

## **CONCLUSIONES GENERALES.**

1.- Según el análisis de las fuentes bibliográficas, los diversos sistemas de comunicación existentes, telegrafía, telefonía, radio, sistemas de satélite, sistemas de transmisión, circuitos de audio, de la fibra óptica, etc. tienen sus áreas específicas de utilización; entre estos sistemas, los de fibra óptica crecen más rápidamente que cualquier otro sector de telecomunicaciones.

2.- En la implementación de los sistemas de comunicación vía fibra óptica, las mediciones de sus parámetros poseen un lugar importante. El parámetro más importante a conocer es la atenuación de la señal en una fibra óptica.

3.- Entre los métodos de medición de la atenuación, el método de corte y sus varias modificaciones es el más adecuado para desarrollar una práctica de carácter docente por su sencillez y costo relativamente bajo, para los estudiantes que hacen su especialización en telecomunicaciones.

4.- En esta tesis se justificó y se desarrolló la propuesta técnica detallada sobre la construcción de una instalación de laboratorio que permite realizar el método de corte en las mediciones de atenuación.

5.- La originalidad de la propuesta consiste en la utilización de los equipos relativamente sencillos y de un costo accesible que no obstante nos permiten lograr las mediciones de la atenuación de una manera precisa y transparente.

## BIBLIOGRAFÍA

S. E. Mi11er and A. G. Chynowenth. "Optical Fiber Telecommunications", Academic Press. -

Steward D. Personick. "Optical Fiber Transmission systems", Plenum Press.

G. Cancellieri. "Single-Mode Optical Fiber", Pergamon Press.

H. Murata. "Handbook of Optical Fibers and Cables", Marcel Decker.

Charles Kao. "Optical fiber systems: technology, design and applications", McGraw-Hill International Book Company.

Jeff Hecht. "Understanding fiber optics", Howard W. Sams & Company. 1-

P. Das. "Lasers and Optical Engineering", Springer-Verlag. Inc.