

**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

**PROCESO DE MIGRACIÓN DEL USO DE CABLE COAXIAL A FIBRA
ÓPTICA HASTA EL HOGAR, IMPLEMENTADO POR UNA EMPRESA
DE TV POR CABLE**



**PRESENTADO POR:
CARLOS ILDEFONSO RODRÍGUEZ FLORES**

**ASESOR:
ING. JUAN CARLOS CASTRO CHÁVEZ**

CIUDADELA DON BOSCO, MARZO DE 2007

**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELECTRÓNICA**



**PROCESO DE MIGRACIÓN DEL USO DE CABLE COAXIAL A FIBRA
ÓPTICA HASTA EL HOGAR, IMPLEMENTADO POR UNA EMPRESA
DE TV POR CABLE**

**Ing. Juan Carlos Castro
Chávez**
Asesor

**Ing. Calixto Rodríguez
Vásquez**
Jurado

**Ing. Walter Arbaiza
Cabrera**
Jurado

**Ing. Oscar Wenceslao
Rivas**
Jurado

CIUADELA DON BOSCO, MARZO DE 2007

**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELECTRÓNICA**



**PROCESO DE MIGRACIÓN DEL USO DE CABLE COAXIAL A FIBRA
ÓPTICA HASTA EL HOGAR, IMPLEMENTADO POR UNA EMPRESA
DE TV POR CABLE**

**Ing. Federico Miguel Huguet
RECTOR**

**Pbro. Víctor Bermúdez
VICERECTOR ACADÉMICO**

**Lic. Mario Rafael Olmos
SECRETARIO GENERAL**

**Ing. Ernesto Godofredo Girón
DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA**

CIUDADELA DON BOSCO, MARZO 2007

AGRADECIMIENTOS

A Dios misericordioso y todo poderoso. A la Luz puesta en este mundo, Samuel Joaquín Flores. A mis padres, Cnel y Lic. Carlos Eliseo Rodríguez Murcia y Marta Teresa Flores de Rodríguez, por su valioso apoyo. A mis hermanos, abuela y toda mi familia por sus palabras de ánimo. A mi esposa, Dra. Andrea Irene Escobar Rodríguez, por mantener mi empeño y entusiasmo en mis labores. A mis amigos.

Carlos Ildfonso Rodríguez Flores

ÍNDICE

Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Introducción	1
Objetivos	3
Alcances	5
Limitaciones	6
Capítulo I Cable coaxial	
1.1 Cable coaxial	7
1.2 Tipos de cable coaxial	8
1.3 Constitución física del cable coaxial	9
1.3.1 Cubierta	11
1.3.2 Conductor externo o apantallamiento	11
1.3.3 Dieléctrico	12
1.3.4 Conductor central	13
1.4 Características matemáticas	14
1.4.1 Cable coaxial en altas frecuencias	14
1.4.2 Cable coaxial frente a bajas frecuencias	19
1.4.3 Cable coaxial frente a frecuencias intermedias	21
1.4.4 Impedancia	21
1.5 Atenuación característica	24
1.5.1 Tamaño del cable	24
1.5.2 Frecuencia	26
1.5.3 Material dieléctrico	27
1.5.4 Temperatura	29
Capítulo II Fibra óptica	
2.1 Fibra óptica	31

2.2	Materiales utilizados	32
2.3	Tipos de fibra óptica	33
2.3.1	Fibras multimodo	36
2.3.2	Fibra multimodo con índice de refracción escalonado	36
2.3.3	Fibras monomodo	39
2.3.4	Fibra multimodo con índice de refracción gradual	40
2.3.5	Fibra monomodo de dispersión desplazada	41
2.3.6	Fibra de dispersión desplazada nula	42
2.3.7	Fibra de dispersión desplazada no nula	43
2.3.8	Fibras con curva de dispersión reducida	44
2.3.9	Fibras compensadoras de dispersión	44
2.3.10	Fibra retenedora de polarización	44
2.3.11	Fibra óptica de plástico	45
2.3.12	Fibra de cristal fotónico	45
2.4	Características matemáticas	45
2.4.1	Atenuación de la fibra	47
2.4.1.1	Calculo de atenuación en decibeles	49
2.4.2	Absorción	50
2.4.3	<i>Scattering</i>	51
2.4.4	Variación espectral	52
2.4.5	Tamaño del núcleo y área efectiva	54
2.4.6	Apertura numérica	55
2.4.7	Dispersión	56
2.4.7.1	Dispersión cromática y guía onda	57
2.4.7.2	Dispersión modal	60
2.4.7.3	Dispersión de polarización	61

Capitulo III Tecnologías aplicables a la fibra óptica para la implementación de fibra hasta el hogar

3.1	Amplificadores ópticos	62
3.1.1	Tipos de amplificación	64

3.1.2 Configuraciones para la amplificación	65
3.2 Repetidores opto electrónicos y regeneradores	67
3.3 Amplificadores de fibra dopada de erbio	68
3.3.1 Niveles de potencia y ganancia	69
3.3.2 Longitudes de onda	70
3.4 Emisión espontánea y aporte de ruido de un amplificador	71
3.5 Amplificadores por efecto de Raman	73
3.6 Amplificadores basados en semiconductores	76
3.6.1 Características	77
3.6.2 Limitantes	77
3.6.3 Arquitectura	79
3.7 Multiplexación óptica por división de longitud de onda	81
3.7.1 Requerimientos para <i>WDM</i>	82
3.7.1.1 Sistemas <i>WDM</i>	82
3.7.1.2 Densidad de los canales	84
3.7.1.3 Separación de los canales ópticos	85
3.7.1.4 Separación selectiva de canales	86
3.7.2 Arquitectura de dispositivos <i>WDM</i>	87
3.8 Multiplexación óptica por división amplia de longitud de onda	90
3.9 Multiplexación óptica por división de densidad de longitud de onda	91
Capitulo IV Estado actual de la empresa de TV por cable	
4.1 Descripción general	92
4.2 Planta interna	94
4.2.1 Estándar de video	94
4.2.2 Señales satelitales	96
4.2.3 Uso del espectro de frecuencia	98
4.2.3.1 Plan de canales	100
4.2.4 Procesamiento de señales en <i>Headend</i>	103
4.2.4.1 Distribución de señales de video codificadas	106
4.2.5 Dispositivos ópticos de planta interna	109

4.2.5.1	Transmisión de señales utilizando tecnología láser	109
4.2.5.2	Recepción de señales láser	114
4.2.5.3	Multiplexación óptica	118
4.2.5.4	Amplificadores ópticos	119
4.2.5.5	Divisores y acopladores ópticos	119
4.3	Distribución de señal en plana externa	121
4.3.1	Arquitectura de la planta externa	123
4.3.2	Dispositivos de planta externa que utilizan fibra óptica	130

Capítulo V Implementación de fibra hasta el hogar

5.1	Generalidades	131
5.2	Proceso	133
5.2.1	Selección de la zona geográfica	134
5.2.2	Diseño de la red	135
5.2.2.1	Redes ópticas pasivas	135
5.2.3	Compra de dispositivos de planta interna según el tamaño de la red externa	138
5.2.4	Compra de dispositivos de planta externa	142
5.2.5	Construcción de red externa	145
5.2.6	Compra de dispositivos a instalar a los clientes	146
5.3	Comparación de costos	147
5.4	Implementación	151
5.5	Comparación general a nivel de cobertura para una red coaxial y una red pasiva de fibra óptica	153
5.5.1	Cable coaxial	153
5.5.2	Fibra óptica	155
5.5.3	Cable coaxial vs fibra óptica	156
5.6	Requerimientos para la nueva red	158
5.6.1	Unión de fibra óptica	158
5.6.1.1	Empalmes de fusión	159
5.6.1.2	Empalmes mecánicos	161

5.6.1.3	Uso de conectores	162
5.6.2	Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo	164
	Conclusiones	167
	Referencias	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Categorías del cable coaxial	9
Tabla 1.2 Diámetro de cables utilizados en planta externa	25
Tabla 1.3 Dimensiones de cables más utilizados en planta interna	25
Tabla 1.4 Valor de atenuación para una señal típica	28
Tabla 1.5 Atenuación en cables para planta interna	28
Tabla 1.6 Resistencia de DC en ohms por cada 1000 pies	30
Tabla 1.7 Resistencia de DC para cables utilizados en interiores	30
Tabla 3.1 Bandas de funcionamiento para amplificadores ópticos	72
Tabla 3.2 Comparación entre los amplificadores <i>EDFA</i> y los Raman	76
Tabla 4.1 Descripción de una señal bajo el estándar <i>NTSC</i>	95
Tabla 4.2 Tabla de frecuencias para <i>VHF</i>	98
Tabla 4.3 Banda media de frecuencias	98
Tabla 4.4 Descripción de la súper banda y la <i>hyper</i> banda	99
Tabla 4.5 Diferencias entre los planes de canales	101
Tabla 4.6 Relación entre los materiales y las longitudes de onda que pueden detectar	115
Tabla 4.7 Niveles de salida de un receptor óptico marca <i>ADC</i> y modelo <i>Homeworx</i>	117
Tabla 4.8 Canales ópticos según la <i>ITU</i>	119
Tabla 5.1 Comparación entre arquitecturas <i>PON</i>	137
Tabla 5.2 Costos de inversión aproximados por nodo	148
Tabla 5.3 Costos aproximados para brindar servicio <i>FTTH</i> a 128 clientes	150
Tabla 5.4 Frecuencia y atenuación para diferentes tipos de cable coaxial	153
Tabla 5.5 Tabla de pérdidas según el tipo de fibra y longitud de onda	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Arquitectura del cable coaxial	10
Figura 1.2 Corte transversal de un cable coaxial	14
Figura 1.3 Circuito equivalente, para usos prácticos, del cable coaxial frente a radio frecuencias	22
Figura 1.4 Circuito que representa a una línea de transmisión	22
Figura 2.1 Estructura básica de una fibra óptica	31
Figura 2.2a Fibra multimodo con índice de refracción escalonado	34
Figura 2.2b Fibra con índice de refracción gradual	35
Figura 2.2c Comparación de hilos de fibra óptica	35
Figura 2.3 Ángulos en los que una señal puede penetrar la fibra óptica	38
Figura 2.4 Relación de tamaño entre núcleo y cubierta	39
Figura 2.5 Índice de refracción de una fibra con un índice gradual y núcleo de $62.5 \mu m$	40
Figura 2.6 Índice de refracción de una fibra con dispersión desplazada	41
Figura 2.7 Representación del índice de refracción de diferentes tipos de fibra	42
Figura 2.8 Índice de refracción de una fibra con dispersión desplazada no nula	43
Figura 2.9 Relación entre las interferencias	47
Figura 2.10 Choque de partículas con un rayo de luz	51
Figura 2.11 Atenuación total	53
Figura 2.12 Acople de la señal óptica y la fibra	54
Figura 2.13 Apertura numérica	55
Figura 2.14 Interferencia simbólica	59
Figura 2.15 Dispersión cromática como resultado de combinar la dispersión del material y del guía onda	59
Figura 2.16 Polaridad versus dispersión	61
Figura 3.1 Esquema del trayecto de una señal	64

Figura 3.2 Diferentes aplicaciones para un amplificador dentro de una red de comunicación	66
Figura 3.3 Diagrama de bloques representando un <i>EDFA</i>	68
Figura 3.4 Señal de salida – Señal de entrada	70
Figura 3.5 Rango de trabajo	71
Figura 3.6 Emisión espontánea amplificada de ruido para un amplificador óptico	72
Figura 3.7 Desempeño de los amplificadores de Raman y <i>EDFA</i>	75
Figura 3.8 Acople entre la fibra óptica y un amplificador basados en semiconductores	78
Figura 3.9 Amplificador óptico basado en semiconductores, integrado en un chip	79
Figura 3.10 Amplificador basado en semiconductores utilizado como un conmutador de señales	81
Figura 3.11 Sistema <i>WDM</i> con ocho canales	82
Figura 3.12 Separación de canales en un sistema <i>WDM</i> de 40 canales y 8 canales	85
Figura 3.13. Separación selectiva de un canal óptico	86
Figura 3.14 Filtros de interferencia separando diferentes longitudes de onda	88
Figura 3.15 Sistema <i>WDM</i> con 40 longitudes de onda	89
Figura 3.16 Longitudes de onda en sistemas <i>CWDM</i>	90
Figura 4.1 Conexión entre una antena, un receptor satelital y un modulador de audio y video	94
Figura 4.2 Formato de un canal que utiliza el estándar <i>NTSC</i>	95
Figura 4.3 Descripción general del uso del espectro de frecuencia	102
Figura 4.4 Portadora interferente presente en un canal de televisión por cable	108
Figura 4.5 Diagrama general de un transmisor	113
Figura 4.6 Respuesta en frecuencia de un transmisor	114
Figura 4.7 Relación entre los materiales y las longitudes de onda	116

Figura 4.8 Diagrama general de un divisor y acoplador óptico	120
Figura 4.9. Configuración de dispositivos	120
Figura 4.10 Flujo de señal de la banda de retorno	122
Figura 4.11 Arquitectura de árboles y ramas	123
Figura 4.12 Arquitectura de árboles y rama con alimentación de una señal de microonda	124
Figura 4.13 Arquitectura <i>FTF</i>	126
Figura 4.14 Arquitectura <i>FTLA</i> o fibra hasta el nodo	127
Figura 5.1 Proceso de migración	133
Figura 5.2 Configuración de equipos en planta interna	139
Figura 5.3 BSMC-24P de <i>Blonder Tongue Laboratories inc</i>	141
Figura 5.4 Transmisor FIBT-10-1550 de <i>Blonder Tongue Laboratories inc</i>	142
Figura 5.5 Divisor óptico para planta externa	144
Figura 5.6 Divisor óptico 1x32 construido por <i>FDK America Inc</i>	144
Figura 5.7 Dispositivo instalado a los clientes	146
Figura 5.8 BSONU-4 de <i>Blonder Tongue Laboratories inc</i>	147
Figura 5.9 Ejemplo del flujo de información para distribuir datos en FTTH	152
Figura 5.10 Comparación de cable y distancia relacionado a 10 dB de pérdida	154
Figura 5.11 Comparación de distancia y cobertura de fibra óptica con una pérdida de 10 dB	156
Figura 5.12 Comparación	157
Figura 5.13 Eliminación de cubierta protectora de los hilos a fusionar	159
Figura 5.14 Eliminación de deformidades en los finales de los hilos a fusionar	160
Figura 5.15 Hilos alineados y listos para ser acercados	160
Figura 5.16 Fusión	161
Figura 5.17 Empalme mecánico	162
Figura 5.18 Conectores de fibra óptica	163
Figura 5.19 Diagrama de bloques de un <i>OTDR</i>	164

Figura 5.20 Parámetros obtenidos en un *OTDR*

165

Figura 5.21 Medición

166

INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones son fundamentales en el desarrollo y distribución de información, también forman un papel muy importante en el entretenimiento y la eficacia con la que las personas tienen acceso a más información a través de diferentes medios que la tecnología permite.

Actualmente la mayoría de las redes están conectadas por algún tipo de cableado, que actúa como medio de transmisión por donde pasan las señales entre los equipos. Hay disponibles una gran cantidad de tipos de cables para cubrir las necesidades y topologías de las diferentes redes, desde las más pequeñas a las más grandes.

Como ejemplo el cable coaxial es de gran utilidad para las empresas de telecomunicaciones, tomando en cuenta dos factores importantes: su precio relativamente bajo en comparación a otros y la fácil manipulación por su flexibilidad. El uso del cable coaxial, dentro de las compañías de distribución de televisión por cable, ha sido el medio de transmisión más aplicado para la implementación y facturación de muchos servicios, y una ventaja para el cliente que solo necesita un cable para gozar de estos beneficios.

La capacidad de poder distribuir señal televisión, Internet, sistemas de seguridad para el hogar, telefonía, entre otros, es la característica más importante para las empresas, de poder agotar el ancho de banda que este tipo de cable provee y así generar más ingresos.

La integración muchos servicios, es un gran beneficio para los clientes, pero hace que las empresas se vean obligadas a mantener un estricto programa de mantenimiento en la red externa, el cual se ve incrementado en épocas de lluvia.

El cable coaxial si bien es cierto provee una gran protección contra las interferencias y otro tipo de ruidos eléctricos, gracias a su apantallamiento y todas sus características de protección eléctrica, debido a la topología de red externa que las compañías de cable utilizan, se crean problemas y hace mucho más susceptible a caídas y pérdida de calidad en los servicios que se prestan.

Uno de los problemas más comunes es la amplificación continua de las señales que se distribuyen a través de este medio, eso debido a la capacidad y cobertura que el cable coaxial permite, provocando en cada etapa de amplificación un aumento en la aportación de ruido eléctrico en la red y una degradación de la calidad y la relación de señal a ruido. Por otra parte el cable coaxial es muy susceptible al medio ambiente; el agua es uno de los factores que mas problemas causa dentro de la degradación y deterioro de los equipos y materiales necesarios en la red.

Son las anteriores algunas de las razones por lo que las compañías buscan nuevos medios de transmisión, que sean menos susceptibles y que requieran menor tiempo en mantenimiento. La fibra óptica provee una mejor distribución, menor degradación de la señal, mayor cobertura de servicios y un aumento en la capacidad de uso de ancho de banda para distribuir servicios a los clientes.

La migración del uso de cable coaxial para la distribución de señal a un sistema de distribución por medio de fibra óptica, llevará a las compañías a reducir los costos de mantenimiento y mejorar la calidad de servicios entre otros.

OBJETIVOS

Objetivo General

Investigar, analizar y crear un proceso, basado en los servicios básicos o de mayor demanda dentro de una empresa, para poder realizar la migración del uso de cable coaxial a fibra óptica, demostrando las mejoras que este cambio brinda, como también los costos y desventajas, los cambios de equipo en planta externa y planta interna para lograr la migración.

Objetivos Específicos

- Investigar las tecnologías más acordes a la optimización del uso de la fibra óptica para la distribución de señales, indicando cuales son más accesibles para la implementación.
- Montar una demostración de los equipos y mediciones necesarias para el mantenimiento y desarrollo de enlaces de redes pasivas ópticas, a nivel de los equipos y herramientas que se encuentren al alcance para este trabajo de graduación. Dentro de los equipos se encuentran, medidores de potencia óptica, transmisores ópticos, receptores ópticos.
- Documentar información de los pasos necesarios para realizar empalmes de fusión en fibra, uso de reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo o conocido por sus siglas en inglés como OTDR, para mediciones del nivel de atenuación de un hilo de fibra óptica; todo esto disponible para ser presentado en medios audiovisuales y ponerlo a disposición en la biblioteca de la universidad.

- Mencionar cual podría ser la siguiente tecnología para migrarse y algunos de los procesos necesarios para completarla.

ALCANCES

Crear una guía que demuestre los pasos necesarios para realizar una migración del uso de cable coaxial a fibra óptica, especificando las necesidades y ventajas que el proceso lleva, así como el incremento en costos para el levantamiento de la red pasiva basada en el uso de fibra óptica.

El proceso creado detallará las características del medio de transmisión a utilizar, analizando las diferentes tecnologías capaces de optimizar el uso del canal, como puede ser la multiplexación óptica.

Las características de los elementos de red externa y planta interna, para realizar la implementación de la nueva tecnología, serán descritas de forma detallada, haciendo énfasis en los elementos a utilizar en planta externa una vez se este utilizando la fibra óptica, como por ejemplo los amplificadores ópticos.

Se montará una demostración basada en medidores ópticos, transmisor y receptor óptico, con los cuales se simulará la transmisión de un canal de TV y como es transmitido y recibido a través de la red de fibra óptica.

LIMITACIONES

- El análisis de esta implementación se reduce a la comparación de empresas legales de distribución de televisión por cable en nuestro país y al estado actual del tipo de distribución de señal.
- Para la validación de resultados solo existe una empresa de cable que implementa en cierto porcentaje el uso de la fibra óptica.
- Acceso limitado a material y equipo de medición.

CAPITULO I

CABLE COAXIAL

1.1 Cable coaxial

La necesidad de transmitir señales de un lugar a otro, haciendo uso de medios guiados, ha llevado al hombre a diseñar y construir diferentes tipos de cable para cumplir ese objetivo.

Los cables se han construido con el principal propósito de conducir electricidad, generalmente utilizando cobre para su implementación o también es de gran uso el aluminio, normalmente rodeados de un material aislante o protector.

El cable coaxial se encuentra formado por dos conductores concéntricos, con diferentes características cada uno.

El primero es un conductor central o también conocido como núcleo, constituido por un hilo sólido o trenzado, generalmente de cobre.

Y el segundo es la parte externa o conductor externo, en forma de tubo para recubrir el conductor central. La configuración de este elemento es una maya trenzada de cobre o aluminio. Uno de los principales objetivos de esta maya es producir un blindaje y retorno a las corrientes.

Entre estos dos conductores se encuentra un material aislante, dieléctrico, cuyas características proporcionan la calidad del cable. Finalmente todo este conjunto de elementos se encuentra protegido por una protección o material aislante.

La diversidad de cables coaxiales existentes en el mercado son tantas como las crecientes aplicaciones que la tecnología demanda. Dentro de cada una de estas características que diferencian a un tipo de coaxial de otro se encuentran el diámetro, impedancia, materiales de construcción, porcentaje de enmallado, etc.

Las múltiples bondades de este tipo de cable, evita ser afectado por interferencias externas y alcanzar buenas distancias de transmisión.

1.2 Tipos de cable coaxial

La forma de clasificar el cable coaxial puede realizarse desde cualquiera de sus principales atributos.

El material dieléctrico utilizado entre el cable central y el conductor externo, es de mucha importancia al definir el coeficiente de velocidad, sin dejar a un lado la calidad del cable. Entre la lista de materiales mas comunes para este uso se encuentran:

- Cable coaxial con dieléctrico de aire: dentro de esta clasificación se subdividen dos tipos, primero, en el que se utiliza material en forma de polietileno en forma de espira, el cual brinda soporte y separación entre los conductores; el segundo tipo construido de tal forma que el polietileno sea lo menos necesario para proporcionar sujeción entre el conductor externo e interno, ésto logrado a partir de perforaciones o canales a lo largo del cable. Dentro de las características más notables de este cable, es su bajo nivel de atenuación.
- Cable coaxial con dieléctrico de polietileno celular o esponjoso: presenta una mayor acumulación de material entre los conductores que conforman este cable, lo cual permite que las atenuaciones sean más elevadas.
- Cable coaxial con dieléctricos de polietileno macizo: la característica principal de este cable es el alto nivel de atenuación que presenta, por lo que se recomienda su uso para conexiones entre puntos que denoten corta distancia (10 – 15 mts aproximadamente).

Otra de las características que definen el comportamiento del cable es su grosor, las siglas RG, que en ingles significan *radio government*, definen especificaciones o características únicas del cable, como es el calibre del conductor central, el grosor y tipo del aislante interno, el tipo de construcción para el apantallamiento o enmallado, el tamaño y tipo del revestimiento del cable. La tabla 1.1 muestra algunos tipos:

Categoría	Impedancia
RG-59	75 Ω
RG-58	50 Ω
RG-11	50 Ω

Tabla 1.1 Categorías del cable coaxial

1.3 Constitución física del cable coaxial

Las tecnologías y métodos que utilizan los fabricantes para construir el cable coaxial, pueden variar entre las compañías, pero convergen en el objetivo de completar las características que hacen especial al cable coaxial.

El uso o aplicación dado al cable coaxial, es la que hace la diferencia en los materiales y métodos utilizados para su construcción, como es el caso del uso en planta externa y planta interna. Una de las diferencias más notables se encuentra en el tamaño, pero aun más importante es la diferencia entre el conductor externo o enmallado. Para el caso de cables para planta externa, se encuentran contruidos con un conductor externo compuesto por aluminio sólido, el cual le impide ser muy flexible. Dentro de su desempeño como conductor la falta de flexibilidad no impide que tenga un comportamiento deseado tanto en altas como a bajas frecuencias.

Para el uso en planta interna, el cable se construye de manera que éste sea flexible. Sin ser provisto de un conductor central de aluminio sólido, este cable posee una combinación de un conductor de forma enmallada de aluminio y una delgada lamina

del mismo material. La característica de flexibilidad dada a este cable, es el que permite su fácil instalación.

Entre las diferencias existentes entre los cables utilizados en planta externa e interna, es la capacidad para la transmisión de señales de poder, para que de esta forma poder proveer de energía a los equipos instalados en la planta externa.

A continuación se describen los principales componentes que constituyen al cable coaxial, los cuales se muestran en la figura 1.1.

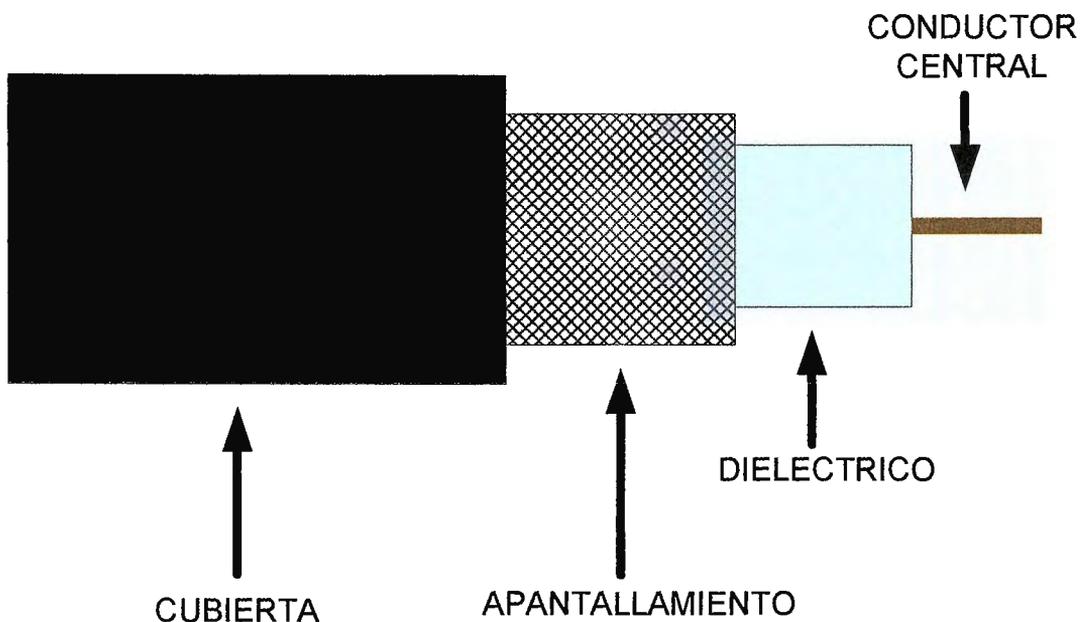


Figura 1.1 Arquitectura del cable coaxial

La figura 1.1 muestra los componentes principales en la construcción del cable coaxial.

1.3.1 Cubierta

La cubierta es el elemento que provee protección al cable. Dentro de los principales objetivos de la cubierta, es impedir que el agua pueda alcanzar los conductores internos y alargar la vida útil del cable en general, ya que éste se encuentra expuesto a todas adversidades del medio ambiente.

Para el uso en planta interna, la cubierta está compuesta por PVC. Para el uso de las acometidas o el cable final para proveer servicio al cliente, se utilizan cables con cubiertas que poseen polipropileno, ya que este material es mas resistente y provee mayor durabilidad frente a la suciedad y exposición a rayos ultravioleta.

Las cubiertas de polipropileno son mas durables que las que se construyen de PVC, pero este ocasiona la perdida de flexibilidad frente a bajas temperaturas. El material utilizado para la construcción de la cubierta del cable, es dictaminado por la Nacional Electric Code ó NEC descrito en sus siglas en ingles.

En planta externa el uso de la cubierta en el cable no es obligatorio, esto regido por la región en la que se utiliza este conductor.

Normalmente el material usado es el polietileno, esto debido por su gran resistencia al medio ambiente y los rayos ultravioleta.

Los cables que no utilizan cubierta, son normalmente implementados en ambientes no corrosivos, ya que esto representa menos costos para las empresas, es mas liviano y refleja los rayos del sol, lo que permite disminuir la atenuación típica del cable en ambientes calurosos.

1.3.2 Conductor externo o apantallamiento.

El conductor externo es uno de los elementos principales para definir el desempeño del cable frente a diferentes señales. El apantallamiento impide el ingreso de señales

no deseadas al conductor central y previene las fugas, además es utilizado como punto de conexión para la polarización del sistema.

Para usos dentro de edificios y acometidas, es común el uso de cables con doble apantallamiento, consistiendo en una malla de aluminio sobre una hoja de igual material. Dentro de áreas con fuertes interferencias en el espacio aéreo, es normal el uso de dos capas de enmallado y hojas de aluminio. Este cuádruple apantallamiento aumenta las proporciones del cable, pero lo hace menos susceptible al ingreso de señales no deseadas.

En los cables de más alta calidad la hoja de aluminio se encuentra pegada al material dieléctrico para acortar las posibilidades de fuga de señal.

Las especificaciones del cable incluyen el porcentaje de enmallado que éste posee, describiendo el porcentaje de área efectiva cubierta por el enmallado. Mientras más alto sea el porcentaje de enmallado es mayor sea el grado de protección del cable.

A diferencia del uso en planta interna o interiores, el cable para planta externa esta provisto de un conductor externo sólido compuesto de aluminio. Algunos tipos de cables de baja atenuación, son construidos con un conductor externo mas delgado de lo común lo cual puede mejorar sus características de flexibilidad pero reduce su resistencia mecánica.

1.3.3 Dieléctrico.

El material dieléctrico aísla el conductor central del apantallamiento, mientras mantiene el conductor interno en el centro del cable. Manteniendo una distancia constante entre el conductor externo y el interno, el material dieléctrico asegura una impedancia que se mantiene constante en todo el cable.

El tipo de material dieléctrico utilizado en el cable, es un factor determinante en cuanto a la atenuación que presentará el cable frente a señales eléctricas.

Un tipo de espuma, producida en base polietileno que posee burbujas de gas, es el material que normalmente se utiliza en cables para interiores y acometidas. Entre más sea el nivel de gas inyectado a la espuma es menor la atenuación eléctrica que presenta el coaxial.

La densidad del material dieléctrico contribuye significativamente a la resistencia mecánica y el volumen de gas se relaciona inversamente con esta característica.

El material dieléctrico utilizado para cables de exteriores, es de las mismas características para los cables de interiores, y producido en procedimientos similares.

En algunos cables con bajo nivel de atenuación se construyen utilizando discos de plástico separados de forma regular. Este tipo de cable puede cambiar aun más su característica de flexibilidad, se conocen comúnmente como cables que utilizan aire como material dieléctrico.

1.3.4 Conductor central.

El conductor central es el encargado de transportar las señales. El nivel de atenuación del cable, está mayormente definido por el material utilizado en la construcción de este conductor. Entre mayor sea la concentración de cobre en el conductor central menor será el nivel de resistencia, reduciendo la atenuación.

Para el uso en empresas de cable, en el que se manejan señales a altas frecuencias, se presenta la conducción de las señales en la parte mas externa del conductor central, denominado efecto piel. Es por esto que algunas empresas que se dedican a la construcción de cable coaxial, proveen al conductor central de un revestimiento de

cobre más puro que el que se encuentra en el centro. En algunas aplicaciones para interiores, se utiliza un tipo de cable con un conductor central revestido de cobre pero con otro tipo de conductor en el centro, esto permite reducir el costo del cable. Por lo general el material utilizado para el centro del conductor se selecciona de tal forma que este ayuda a mejorar la resistencia mecánica del cable. La constitución del conductor central en los cables utilizado en exteriores, es caracterizada por el uso de capas externas de cobre con un centro de aluminio, aunque también se utilizan con un porcentaje total de cobre. Los conductores de cobre presentan mayor durabilidad y menor resistencia a las señales de DC, pero los que se encuentran constituidos por capas externas de cobre y centros de aluminio son mas livianos y sus características frente a altas frecuencias son similares.

1.4 Características matemáticas

1.4.1 Cable coaxial en altas frecuencias.

En este apartado se presentarán los parámetros del cable coaxial tales como resistencia, conductancia, inductancia y capacitancia frente a una señal de alta frecuencia.

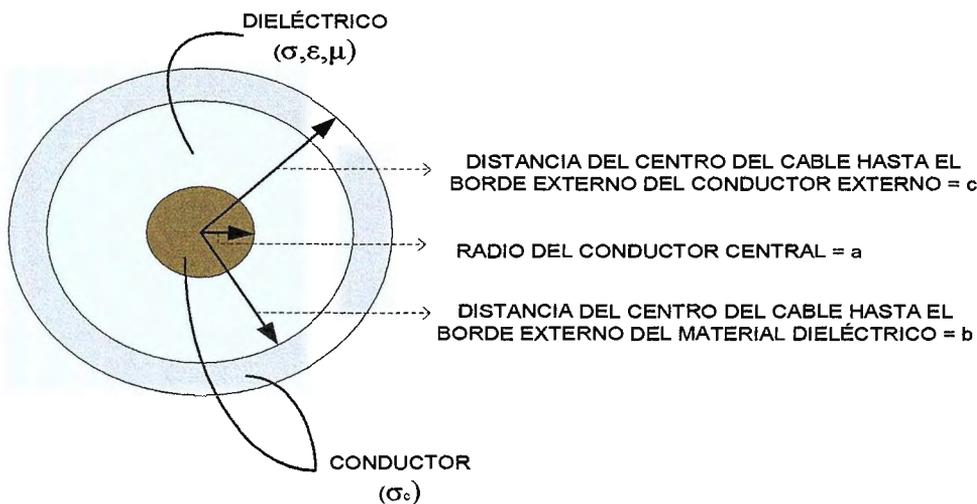


Figura 1.2 Corte transversal de un cable coaxial

Basándonos en la figura 1.2, la cual describe cada una de las partes que conforman el cable coaxial y designando al radio del conductor interno la letra a, la distancia del centro del cable al borde externo del material dieléctrico la letra b.

De la fórmula de capacitancia por unidad de longitud se tiene

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{Fórmula 1.1}$$

Tomando en cuenta que el valor de permitividad (ϵ) a utilizar, debe ser conforme al rango de frecuencias de este calculo.

Utilizando una analogía muy particular para el cálculo de la densidad de corriente en un medio conductor y la densidad de flujo eléctrico en un medio dieléctrico. Parte de esta analogía se basa en que la ley de Ohm y la relación con el gradiente únicamente se utilizan para corrientes directas, así:

$$J = \sigma E_{\sigma} \quad \text{Fórmula 1.2}$$

$$E_{\sigma} = -\nabla V_{\sigma} \quad \text{Fórmula 1.3}$$

Y para el caso de un material dieléctrico homogéneo

$$D = \epsilon E_{\epsilon} \quad \text{Fórmula 1.4}$$

$$E_{\epsilon} = -\nabla V_{\epsilon} \quad \text{Fórmula 1.5}$$

De las fórmulas anteriores, V representa los potenciales, E las intensidades de campo eléctrico, la conductividad σ , la permitividad ϵ , densidad de corriente J y densidad de flujo eléctrico D .

Siguiendo los pasos de esta analogía ⁽¹⁾, se puede obtener de la expresión mostrada en la fórmula 1.1, se consigue la siguiente expresión:

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{Fórmula 1.6}$$

Donde G es la conductancia, σ es la conductividad del dieléctrico existente entre los conductores a la frecuencia de operación.

Utilizando la expresión básica de la inductancia:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad \text{Fórmula 1.7}$$

Donde I es la corriente que fluye en una espiral conformada por N vueltas, el cual produce un flujo total Φ .

Siguiendo los pasos descritos en ⁽¹⁾, se define la expresión para la inductancia por unidad de longitud en un cable coaxial.

$$L_{ext} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{Fórmula 1.8}$$

Donde μ representa la permeabilidad de dieléctrico existente entre los conductores, generalmente representada por μ_0 .

La fórmula 1.8 describe una inductancia externa, ya que en el proceso el cual determina esta expresión no se toma en cuenta ningún flujo dentro de ninguno de los conductores.

La fórmula utilizada anteriormente para describir la inductancia por unidad de longitud, es una buena aproximación para representar el comportamiento de una línea de transmisión en altas frecuencias, ya que a causa del flujo de corrientes en la superficie de los conductores y no dentro de ellos, denominado efecto piel, hace despreciable el hecho de considerar algún flujo dentro de los conductores al igual que la inductancia interna.

Tomemos en cuenta que

$$L_{ext} C = \mu \epsilon = \frac{1}{v^2} \quad \text{Fórmula 1.9}$$

Lo que permite evaluar la inductancia externa para cualquier línea de transmisión donde se conoce la capacitancia y las características del aislante.

El último de los parámetros necesarios para describir el comportamiento del cable coaxial es la resistencia R por unidad de longitud.

Para este cálculo en altas frecuencias, la profundidad de piel δ es muy pequeña por lo que se obtiene una expresión apropiada para R, distribuyendo de forma uniforme la corriente total a lo largo de la profundidad δ .

Tomado de ⁽¹⁾, se obtiene una distancia denotada por el símbolo δ y denominada profundidad de penetración o profundidad de piel.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} \quad \text{Fórmula 1.10}$$

En altas frecuencias y para un conductor con una sección transversal circular, condicionando que el radio a (tomado de la figura 1.2) sea mucho mayor a la profundidad de piel, se define la siguiente expresión para la resistencia en alta frecuencia.

$$R_{\text{interno}} = \frac{1}{2\pi a \sigma_c \delta} \quad \text{Fórmula 1.11}$$

Se toma en cuenta también la resistencia que presenta el conductor externo del cable coaxial, que tiene un radio interno b .

Suponiendo la misma conductividad σ_c y el mismo valor de profundidad de piel δ , por lo que se obtiene:

$$R_{\text{externo}} = \frac{1}{2\pi b \sigma_c \delta} \quad \text{Fórmula 1.12}$$

Debido a que la corriente de la línea fluye a través de estas dos resistencias en serie, se suman estas dos resistencias:

$$R = \frac{1}{2\pi \delta \sigma_c} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad \text{Fórmula 1.13}$$

La impedancia característica de un cable coaxial se define como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{ext}}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a} \quad \text{Fórmula 1.14}$$

1.4.2 Cable coaxial frente a bajas frecuencias

En este caso, el comportamiento del cable coaxial no presenta un efecto piel y donde se supone que se distribuyen uniformemente a lo largo de la sección transversal.

La distribución de la corriente en el conductor no afecta ni a la capacitancia ni a la conductancia por unidad de longitud, por lo tanto se puede hacer uso de la fórmula 1.1 para poder definir este parámetro.

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{Fórmula 1.1}$$

De igual forma la conductancia

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{Fórmula 1.6}$$

Para la resistencia por unida de longitud se tiene $R = \frac{L}{\sigma\zeta}$, en donde $L = 1\text{m}$ y σ_c es la conductividad de los conductores interno y externo. Definiendo el área transversal del conductor central πa^2 y la del conductor exterior es $\pi(c^2 - b^2)$. Sumando ambos valores de resistencia tenemos:

$$R = \frac{1}{\sigma_c \pi} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2 - b^2} \right) \quad \text{Fórmula 1.15}$$

En el caso de cálculo de la inductancia (externa) por unidad de longitud hecho para altas frecuencias, este constituye la mayor parte de la inductancia total. Pero en el caso de bajas frecuencias, falta agregar términos que representen las inductancias internas de los conductores interno y externo.

Para definir la inductancia interna del conductor central nos basaremos en ⁽¹⁾, de lo que resulta

$$L_{a,int} = \frac{\mu}{8\pi} \text{ H/m} \quad \text{Fórmula 1.16}$$

Para determinar la inductancia de la capa exterior, se debe determinar la energía almacenada por unidad de longitud en un cascarón cilíndrico externo con radio interno b y radio externo c, a través del cual cruza una distribución de corriente uniforme. De lo que obtenemos

$$W_H = \frac{\mu I^2}{16\pi(c^2 - b^2)} \left(b^2 - 3c^2 + \frac{4c^4}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b} \right) \quad \text{Fórmula 1.17}$$

Utilizando la fórmula 1.17 la inductancia interna del conductor externo a frecuencias muy bajas es

$$L_{bc,int} = \frac{\mu}{8\pi(c^2 - b^2)} \left(b^2 - 3c^2 + \frac{4c^4}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b} \right) \quad \text{Fórmula 1.18}$$

Al combinar las fórmulas 1.8, 1.16 y 1.18 se obtiene

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4(c^2 - b^2)} \left(b^2 - 3c^2 + \frac{4c^4}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b} \right) \right] \quad \text{Fórmula 1.19}$$

1.4.3 Cable coaxial frente a frecuencias intermedias

En este espacio de frecuencias se debe tomar en cuenta que la distribución de corriente esta regida por las funciones de Bessel.

1.4.4 Impedancia

Muchos sistemas de comunicación utilizan líneas de transmisión para transportar señales de un punto a otro. Cada una de las líneas de transmisión posee una impedancia característica, denotada por Z , que debe coincidir con la impedancia del transmisor y el receptor para que se pueda dar la máxima transferencia de potencia de la señal a través del sistema.

La impedancia característica del cable coaxial utilizado en sistemas de comunicación es de 75 ohms.

La impedancia puede ser definida como la combinación del efecto de una resistencia y la reactancia capacitiva e inductiva, en una señal frente a una frecuencia particular.

Eléctricamente, el cable coaxial se puede considerar como una serie de bobinas y capacitares para las radio frecuencias transmitidas a través de el. La impedancia debe presentar un valor consistente para todo el ancho de banda de transmisión, cualquier cambio en la impedancia, ya sea este ocasionado por el desacople entre el cable y el conector o entre e conector y el puerto del dispositivo a ser conectado, ocasionará que la potencia sea reflejada. Este reflejo de la potencia puede causar errores en señales digitales y un tipo de imágenes fantasma en las señales de televisión. En algunos casos, las consecuencias se pueden manifestar en el daño irreparable del equipo.

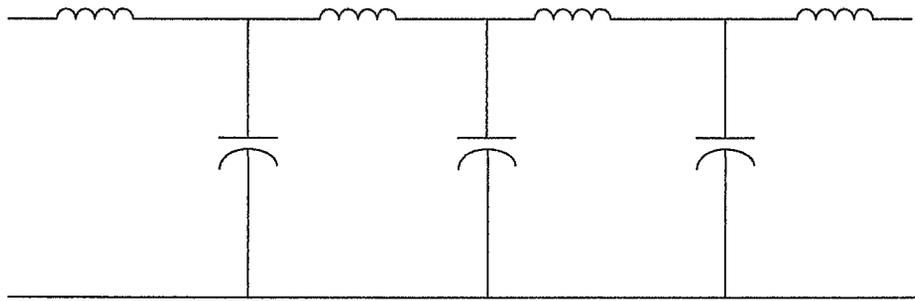


Figura 1.3 Circuito equivalente, para usos prácticos, del cable coaxial frente a radio frecuencias.

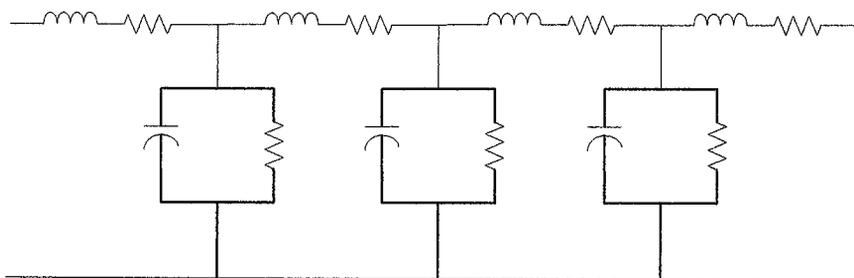


Figura 1.4 Circuito que representa a una línea de transmisión. Cable coaxial como un circuito eléctrico.

Tres factores principales son los que determinan la impedancia del cable coaxial: diámetro interno del conductor externo, diámetro externo del conductor interno y el tipo de material dieléctrico utilizado para separa ambos conductores.

Si los parámetros de alguno de estos factores cambian, deberá cambiar otro factor para mantener un valor de 75 ohms como impedancia. Para entender esta relación, se pueden comparar el diámetro del conductor central de dos cables coaxiales que posean diferente material dieléctrico. Por ejemplo el conductor interno de un cable coaxial serie 6, utilizando polietileno sólido como material dieléctrico es mucho mas pequeño que un cable de la misma serie pero que utiliza espuma como dieléctrico, sin embargo el diámetro externo del cable sigue siendo el mismo.

Si el valor de impedancia se mantiene exactamente a 75 ohms en todo el cable, se asegura una máxima transferencia de potencia. Si alguno de los 3 factores descritos anteriormente cambia, la impedancia también cambia, creando una variación de impedancia en alguna sección del cable.

El resultado de esta variación de la impedancia genera que una porción de la señal transmitida se refleje y regrese hacia la fuente que generó la señal. La pérdida por reflexión de la onda describe la relación entre la potencia transmitida y la potencia reflejada, representándose en decibeles (dB) ⁽¹⁾.

Por ejemplo, si un dispositivo posee una pérdida por reflexión de 20 dB, la reflexión producida por el dispositivo sera de 20 dB por debajo (menor que) la señal original. Si el nivel de la onda reflejada es pequeño, la pérdida por reflexión será una un numero relativamente grande.

Las ondas reflejadas por variaciones en la impedancia mezcladas con señales originan un fenómeno llamado ondas estacionarias ⁽¹⁾. Son algunas combinaciones de ondas reflejadas en fase o fuera de fase con la señal original. Si la señal se encuentra en fase, tienden a unirse e incrementarse en potencia. Si se encuentran fuera de fase, se reducen en potencia entre ellas o pueden anular por completo la señal original.

La relación de fase entre la señal original y las ondas reflejadas crean alternancia entre el incremento o disminución de potencia de la señal. Cuando se observa a través de un analizador de espectro toda la banda de frecuencia de comunicación, crea una similitud a ondas.

Durante la construcción del cable coaxial, son introducidas algunas discontinuidades en la impedancia. Estas discontinuidades se mantienen en un nivel mínimo, bajo un estricto control de producción.

1.5 Atenuación característica

Es sabido que la potencia de una señal se ve reducida a medida esta viaja a través del cable coaxial y que el nivel de atenuación es representado en decibeles (dB). La atenuación se ve afectada por diversos factores físicos y ambientales. A continuación se mencionaran algunos de éstos.

1.5.1 Tamaño del cable

Cables coaxiales utilizados para recorrer largas distancias normalmente tienen bajos niveles de atenuación, debido al incremento en el diámetro de su conductor central o interno. A mayor diámetro del conductor central generalmente significa menor resistencia. La resistencia del conductor central es la responsable de la mayor parte del nivel de atenuación de un coaxial. Cerca de un 60% del total de la atenuación de la señal se relaciona con el conductor interno.

Para el uso de cables en planta externa se encuentran disponibles muchos tamaños, los cuales proveen flexibilidad en el diseño de un sistema de comunicación. El tamaño y tipo de cable utilizado en planta externa, tienen un impacto directo en el número de amplificadores y fuentes de poder necesarios en el sistema.

Generalmente el tamaño del cable se determina por el diámetro externo del enmallado o conductor externo. El cobertor o protector del cable no es tomado en cuenta para determinar las dimensiones del coaxial.

En la tabla 1.2 se describen algunos de los tamaños de cable más utilizados en planta externa.

.412	.440	.500	.540	.625	.650	.750	.860	.875	1.000	1.125
------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------

Tabla 1.2 Diámetro de cables utilizados en planta externa (en pulgadas) ⁽²⁾

El tamaño del conductor central no es siempre el mismo para cables que posean igual diámetro, debido a la gama de materiales dieléctricos utilizados en la construcción de los cables, lo cual se ve relacionado para poder mantener una impedancia igual para todos.

El tamaño de cables utilizado en planta interna o para acometidas se lista a continuación en la tabla 1.3

Tipo de cable	Diámetro del conductor central (pulgadas)	Diámetro del cable (pulgadas)
Serie 59	0.032	0.242
Serie 6	0.04	0.272
Serie 11	0.064	0.405

Tabla 1.3 Dimensiones de cables más utilizados en planta interna.

El uso de estos tipos de cables dentro de un sistema de televisión por cable, es a criterio del diseño, ya que se toman en cuenta distribuciones y pérdidas por distancia.

En un tiempo se utilizaron las letras RG, Radio Grade por sus siglas en ingles, para designar las series a los cables, pero en la actualidad ya no se usa.

La serie 59 se usa por lo general para cableado al interior de los hogares o en sitios donde no se recorren distancias largas. Este cable presenta una atenuación muy alta y de los tipos de cables mencionados en la tabla 1.3 es el menos caro. Dentro de las compañías de televisión por cable se utiliza para realizar conexiones en sistemas que utilizan un ancho de banda menor que 300 MHz.

La selección del uso de la serie 6 es la más utilizada para empresas de transmisión. Es utilizado por lo general para realizar la acometida entre el punto de distribución de señal en la planta externa y el cliente para una compañía de televisión por cable. Mantiene una buena relación entre el costo y los resultados obtenidos, ya que exhibe una atenuación aceptable frente a altas frecuencias.

La serie 11 es un cable con baja atenuación y relativamente una cara solución en sistemas de comunicación. Es utilizado por lo general para clientes que requieran de largos recorridos de cable para realizar la acometida.

1.5.2 Frecuencia

La atenuación no es la misma para diferentes frecuencias. La atenuación se ve incrementada al mismo tiempo que aumenta la frecuencia de transmisión de las señales. Por lo general la señal viaja a través del centro del conductor interno del cable coaxial, pero en altas frecuencias la señal viaja por la superficie externa del conductor, nombrando a este fenómeno como efecto piel ⁽¹⁾.

El efecto piel permite a la industria de las telecomunicaciones utilizar cables coaxiales con conductores centrales bañados con cobre, para el transporte de altas frecuencias. El metal interno que compone a este conductor provee dureza, mientras el revestimiento de cobre provee un transporte mas eficiente para las señales.

1.5.3 Material dieléctrico

El material dieléctrico utilizado en la construcción del cable coaxial ayuda a determinar, al igual que el tamaño del conductor central, la impedancia característica.

En los últimos años la modernización en la manufactura del cable coaxial, a permitido ofrecer diferentes tipos de cables, construidos con diferentes materiales dieléctricos, que van desde los cables con menor atenuación hasta los que permiten mayor flexibilidad; sin hacer a un lado la relación entre las bondades de estos conductores y su alto costo.

Existe una alta gama de materiales dieléctricos en los cables usados en planta externa, viniendo desde el uso del plástico hasta espuma de gas inyectado. Cada tipo de dieléctrico afecta la atenuación de la señal de formas diferentes. Dieléctricos que contienen cantidades significantes de aire (espuma de gas inyectado o discos de plástico) proveen los niveles más bajos de atenuación, mientras que los dieléctricos formados por plástico sólido proveen los niveles más altos.

El material dieléctrico juega un papel muy importante, ya que ayuda a definir la estructura y manejabilidad del cable. El dieléctrico mantiene en buena relación de distancia al conductor interno y externo. Los constructores de cable coaxial manejan una relación entre baja atenuación y estructura física del cable para soportar tensiones u otro tipo de fuerzas.

Las empresas que manufacturan cable coaxial proveen especificaciones de atenuación en dB por cada 100 pies (dB/100 pies). Esta especificación se basa por lo general en una temperatura de 68 °F. El valor de atenuación también se ve afectada por el nivel de temperatura al cual se encuentre el cable.

La tabla 1.4 muestra valores de atenuación para una señal típica.

Frecuencia (MHz)	0.500 espuma	0.540 espuma	0.650 Aire	0.750 Espuma	1.000 Aire
5	0.16	0.14	0.11	0.11	0.07
50	0.52	0.44	0.36	0.35	0.23
220	1.11	0.98	0.78	0.76	0.50
400	1.53	1.33	1.06	1.05	0.70
550	1.82	1.58	1.25	1.24	0.82
750	2.16	1.85	1.50	1.48	0.97
1000	2.52	2.17	1.77	1.74	1.16

Tabla 1.4 Valor de atenuación (por cada 100 pies a 68 °F) para una señal típica
(2)

En la actualidad los cables utilizados en planta interna utilizan como material dieléctrico el polietileno inyectado con aire, creando burbujas.

Frecuencia (MHz)	Serie 59	Serie 6	Serie 11
5	0.79	0.60	0.38
50	1.74	1.32	0.87
240	3.67	2.93	1.96
400	4.75	3.81	2.56
550	5.57	4.49	3.03
750	6.55	5.27	3.47
1000	7.61	6.11	4.10

Tabla 1.5 Atenuación en cables para planta interna (por cada 100 pies a 68 °F) (2)

Se debe tomar en cuenta que la tabla 1.5 muestra valores de atenuación para una temperatura ambiente de 68 °F. Algunos fabricantes de cable brindan sus especificaciones para una temperatura de 70 °F. La diferencia entre 70 °F y 68 °F es insignificante.

Analizando la tabla 1.5, se puede notar que simplemente cambiando de serie 59 a serie 6, resulta un cambio de un poco más de 1 dB en el valor de atenuación por cada 100 pies a 550 MHz.

1.5.4 Temperatura

Para la mayoría de conductores, incluyendo el cable coaxial, la resistencia se ve incrementada a medida la temperatura se eleva y disminuye al mismo tiempo que la temperatura lo hace. Este efecto se da debido a que los electrones tienen mayor dificultad de movimiento cuando el material conductor se encuentra tibio que cuando se encuentra frío.

El efecto del cambio de temperatura en el cable coaxial es predecible. Por cada 10 °F de cambio en la temperatura, aproximadamente ocurre un cambio de un 1% en la atenuación. Esta regla puede ser aplicada para todos los tipos y tamaños de cable coaxial. Si se da un cambio de temperatura de 70 °F a 40 °F (un cambio de 30 °F), la variación en la atenuación del cable coaxial será de un 3%.

1.5.5 Resistencia de DC o resistencia a baja frecuencia

Este valor se puede considerar como el nivel de resistencia obtenido entre el conductor externo y el interno.

Para medir este nivel se puede hacer cortando una sección de cable y uniendo en uno de los extremos el conductor central con el conductor externo y en el otro extremo verificar el nivel con un voltímetro.

Esta especificación es descrita por los constructores de cable coaxial y usualmente es dada en ohms por cada 1000 pies ($\Omega/1000$ pies).

El material con el que esté hecho el conductor central es el que primordialmente afecta a esta resistencia. Conductores de cobre sólido tienen menor resistencia de DC que los conductores contruidos a base de un baño de cobre y un centro de otro metal.

La tabla 1.6 muestra información de valores de resistencias DC para algunos tipos de cable.

Conductor Central	0.500 Dieléctrico de espuma	0.650 Dieléctrico de aire	0.750 Dieléctrico de espuma	1.000 Dieléctrico de aire
Cobre sólido	1.23	0.75	0.56	0.26
Aluminio con baño de cobre	1.72	1.01	0.76	0.35

Tabla 1.6 Resistencia de DC en ohms por cada 1000 pies (Ω /1000 pies) ⁽²⁾

TIPO DE CABLE	RESISTENCIA DE DC (Ω /1000 pies)
Serie 59	59.9
Serie 6	39.6
Serie 11	19.5

Tabla 1.7 Resistencia de DC para cables utilizados en interiores ⁽²⁾

CAPITULO II

FIBRA ÓPTICA

2.1 Fibra óptica

La idea del uso de la fibra óptica para comunicarse, probablemente se remonta a la época prehistórica cuando se utilizaban las señales fuego.

El primer telégrafo fue a través de señales ópticas que establecían la comunicación de un lugar a otro, este dispositivo fue creado por Claude Chappe en 1790.

La estructura básica de una fibra óptica es de alguna forma sencilla. El hilo por el cual viaja la luz este constituido por un material que posee un índice de refracción mas alto que el material cobertor que rodea al hilo, así como se muestra en la figura 2.1.

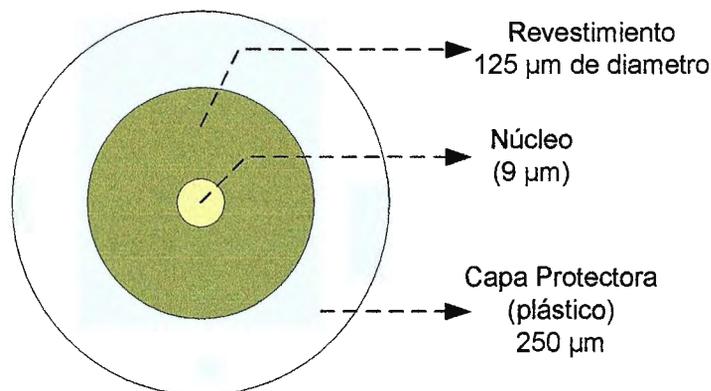


Figura 2.1 Estructura básica de una fibra óptica.

La diferencia existente en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento del núcleo, causa una refracción tal que la luz es guiada a través del núcleo. De la figura 2.1 se pueden destacar dos elementos fundamentales para el buen funcionamiento de la fibra óptica, el núcleo y el revestimiento.

Las dimensiones del núcleo y el revestimiento pueden variar según los diferentes tipos de fibra.

Las fibras construidas para imágenes de alta resolución, tienen un revestimiento delgado envolviendo a núcleos pequeños; para transmitir altas potencias de iluminación normalmente se utilizan núcleos más grandes con revestimientos delgados. En contraste, las fibras utilizadas en las telecomunicaciones poseen capas más densas de revestimiento envolviendo a pequeños núcleos. El límite entre el núcleo y el revestimiento puede poseer un cambio en el índice de refracción agudo o de forma gradual. Las fibras de alto desempeño poseen múltiples capas en límite entre el núcleo y el revestimiento.

Generalmente el diámetro del revestimiento para las fibras utilizadas en telecomunicaciones es de $125 \mu\text{m}$ o 0.005 pulgadas. Una capa protectora de plástico incrementa el diámetro aproximadamente en $250 \mu\text{m}$, facilitando el manejo y protegiendo la superficie del cristal del núcleo de cualquier tipo de daño o suciedad. Las dimensiones de la fibra están dadas en unidades métricas.

2.2 Materiales utilizados

La mayoría de fibras se encuentran construidas con cristales puros, con pequeños niveles de impurezas para ajustar el índice de refracción. Desde un punto de vista químico, las fibras más utilizadas en telecomunicaciones están compuestas esencialmente de dióxido de silicio, conocido como silicio (SiO_2). Las fibras utilizadas en intervenciones quirúrgicas y para iluminación se encuentran constituidas por cristales menos puros.

Algunos tipos de fibras son hechas de plástico, el cual no es tan claro como el cristal pero es más flexible y fácil de manejar. Algunas fibras compuestas de cristal se encuentran recubiertas con plástico, pero generalmente el plástico es utilizado como una capa protectora para protección contra esfuerzos mecánicos.

Fibras utilizadas en propósitos especiales están hechas de otros materiales, como ejemplo con compuestos de fluoruro, utilizadas para aplicaciones donde se utilizan

infrarrojos. Estas fibras son conocidas como cristales ya que su estado no es cristalino, y se les identifica como Fibras de cristal con compuestos de fluoruro.

2.3 Tipos de fibra óptica

El concepto de la fibra se aproxima a un guiador de luz en muchos casos. La física relacionada a la óptica es compleja, debido a que fibra es en realidad un guía onda y la luz es realmente un onda electromagnética con una frecuencia dentro del rango óptico.

Al igual que otros guía ondas, una fibra óptica guía las señales de luz en diferentes formas, denominadas modos. Estos modos definen la distribución de luz a través del guía onda.

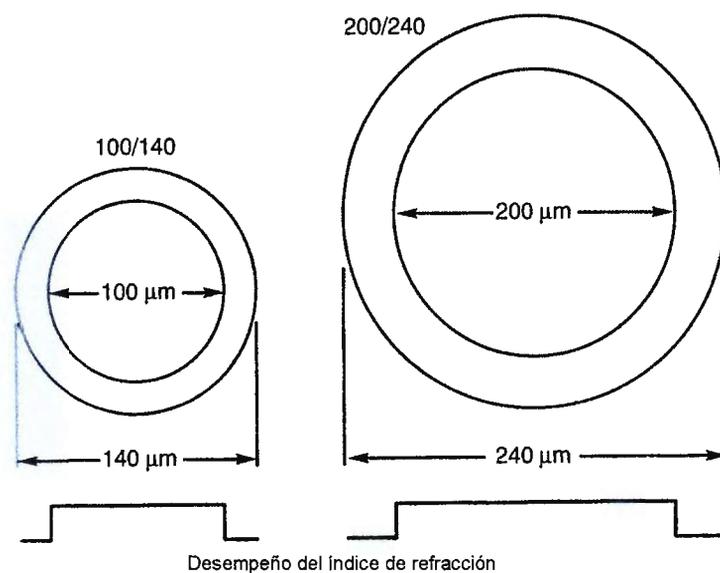
Los modos se relacionan estrechamente con la longitud de onda y la variación en el índice de refracción del límite entre el núcleo y el revestimiento. Los diferentes índices de refracción que presenta este límite, es lo que define las condiciones de cómo la onda electromagnética viaja a través del hilo de fibra, como si esta fuera eco que va rebotando entre paredes.

Los dos factores que afectan directamente al desempeño de una fibra óptica son en primer plano, la relación núcleo-revestimiento y la composición del vidrio utilizado para construir la fibra. El tamaño del núcleo y el revestimiento, incluyendo la naturaleza del vidrio entre ellos determinan las propiedades de la fibra en sus modos respectivos y como se transmitirá la luz a diferentes longitudes de onda.

Combinando otros aspectos de menor importancia, estos factores son los que determinan las características de la fibra óptica, incluyendo:

- Atenuación como una función de la longitud de onda.
- La capacidad de captar luz.

- Modos de transmisión.
- Capacidad de transmisión relacionada a la longitud de onda.
- Tolerancia a la conectividad a otras fibras.
- Longitudes de onda operativas.
- Tolerancia frente a altas temperaturas y otros factores ambientales.
- Dureza y flexibilidad.
- Costo.



Desempeño del índice de refracción

Figura 2.2a. Fibra multimodo con índice de refracción escalonado ⁽³⁾

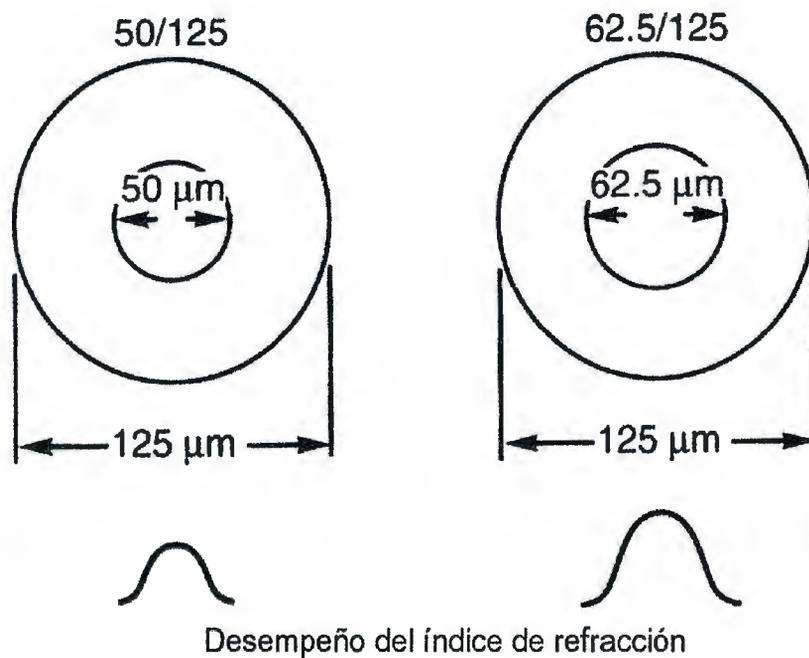


Figura 2.2b. Fibra con índice de refracción gradual ⁽³⁾

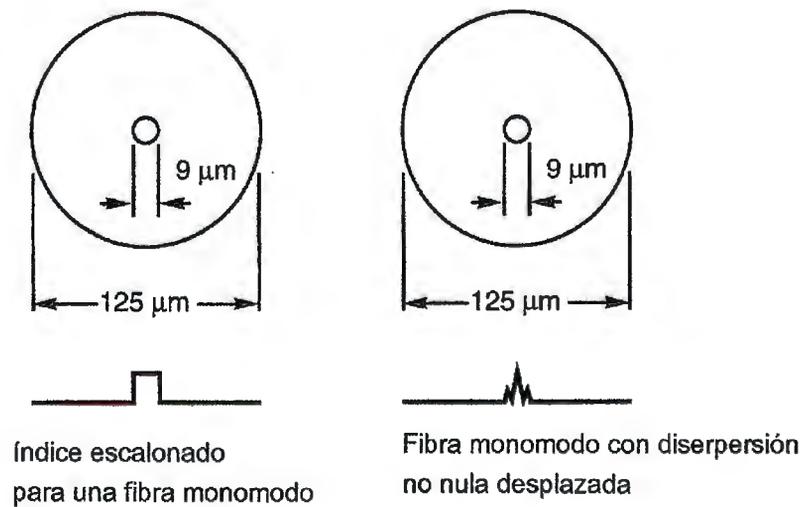


Figura 2.2.c Comparación de hilos de fibra óptica ⁽³⁾

En las figuras 2.2 se muestran diferentes tipos de fibra con una gráfica del índice de refracción a través del núcleo y el revestimiento, nombrada perfil del índice de refracción.

2.3.1 Fibras multimodo

Estas fibras fueron las primeras en comercializarse y ser fabricadas. Su nombre es atribuido a la capacidad de poder transmitir múltiples modos simultáneamente, esto debido al tamaño de su núcleo, más grande en comparación con las fibras monomodo.

El número de modos que se pueden propagar por una fibra depende de su apertura numérica o conocido también como cono de aceptación de luz a la entrada. El gran tamaño en su diámetro permite el acoplamiento de la fibra, pero debido a su dispersión modal reduce su ancho de banda de trabajo.

Los tamaños de los núcleos y revestimiento típicos son de $50/125 \mu m$ y $62.5/125 \mu m$.

2.3.2 Fibra multimodo con índice de refracción escalonado.

Filamentos transparentes rodeados por aire son los tipos más simples de fibra óptica, pero éstos no funcionan bien en la práctica. Recubriendo la fibra con un material transparente con un índice de reflexión menor al del núcleo, protegerá al núcleo portador de la luz de daños en la superficie, suciedad y contacto con otros materiales similares, asegurándose que la luz no escapará por la superficie. Esta fibra consiste de dos capas de material, el núcleo y el revestimiento, los cuales poseen diferentes índices de refracción. Al observar la figura 2.2.a se nota el cambio abrupto en el índice de refracción al pasar del núcleo al recubrimiento.

Muchas veces el diámetro de la fibra es mucho mayor que el valor de la longitud de la onda de la señal que se transmitirá a través de ésta. Se puede calcular las propiedades de la fibra al utilizar un modelo simple basado en la luz como un rayo. El requerimiento fundamental para poder guiar la luz, es que el núcleo debe poseer un índice de refracción mayor que el recubrimiento.

El ángulo crítico para obtener una refracción interna total representada por θ_c , depende del valor del índice de refracción del núcleo y del revestimiento.

Se puede utilizar la siguiente formula:

$$\theta_c = \sec\left(\frac{N_{\text{Revestimiento}}}{N_{\text{Núcleo}}}\right) = \sec\left(\frac{\frac{C_{\text{vacio}}}{C_{\text{Revestimiento}}}}{\frac{C_{\text{vacio}}}{C_{\text{Núcleo}}}}\right) \quad \text{Fórmula 2.1}$$

Donde C es la velocidad de la luz.

Para una fibra, la diferencia es mínima, es cercano a 1% por lo tanto el ángulo es $\sec(0.99)$, o alrededor de 82° . Debido a que el ángulo se mide tomando como referencia una línea perpendicular a la superficie de la fibra, lo que significa que los rayos de luz que no se encuentran a más de 8° del eje de la fibra son reflejados, como se muestra en la figura 2.3.

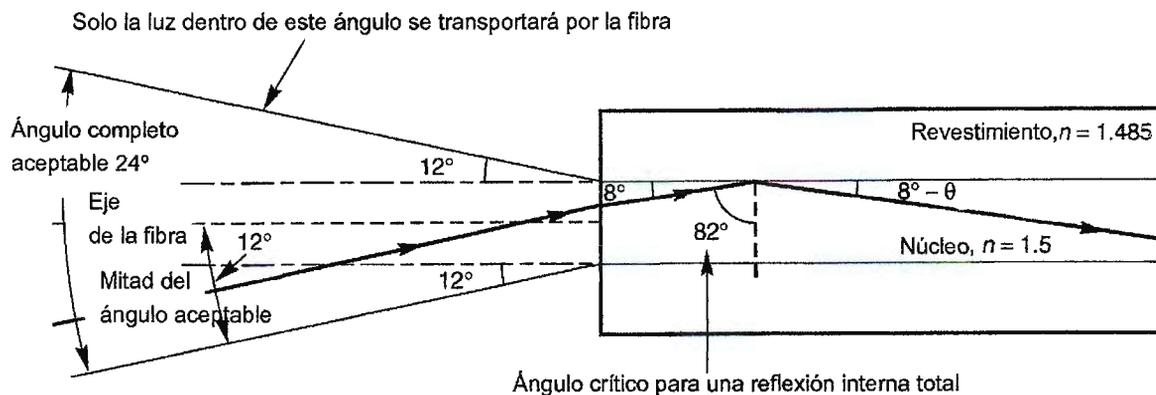


Figura 2.3 Ángulos en los que una señal puede penetrar la fibra ⁽³⁾

También se puede calcular el ángulo de confinamiento medido a partir del límite entre el núcleo y el revestimiento ($\theta_{\text{confinamiento}}$) utilizando arcos, así:

$$\theta_{\text{confinamiento}} = \arccos\left(\frac{N_{\text{Revestimiento}}}{N_{\text{Núcleo}}}\right) \quad \text{Fórmula 2.2}$$

El ángulo de confinamiento es el ángulo más grande con el que el rayo de luz puede enfrentar al borde del núcleo y el revestimiento.

La refracción se da cuando la luz entra al vidrio proveniente del aire. Para calcular el ángulo aceptable, medido en el aire, se debe contar con la ley de refracción.

$$\text{Sen}\theta_{\text{medio-aceptable}} = N_{\text{núcleo}} * \text{sen}\theta_{\text{confinamiento}} \quad \text{Fórmula 2.3}$$

Se puede calcular el ángulo medio-aceptable de

$$\theta_{\text{medio-aceptable}} = \arcsen(N_{\text{núcleo}} * \text{sen}\theta_{\text{confinamiento}}) \quad \text{Fórmula 2.4}$$

Duplicando el ángulo medio aceptable nos da como resultado el ángulo completo aceptable.

2.3.3 Fibras monomodo

Una diferencia importante entre los guidores de microondas y las fibras con núcleos grandes e índice de refracción escalonado, es el número de modos que estas pueden transmitir. Los guidores de microondas debido a sus dimensiones solo pueden propagar ondas de un solo modo.

Una de las características principales de esta fibra es que tiene diámetros pequeños lo cual le permite transmitir un solo modo. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias y transmitir elevadas tasas de bit, las cuales vienen limitadas principalmente por la dispersión cromática y los efectos no lineales. Además estas fibras poseen su diámetro del núcleo, en el mismo orden de la longitud de onda de la señal que van a transmitir.

El tamaño de estas fibras hace muy difícil el manejo de estos e incrementa la cantidad de problemas a la hora de las conexiones. La figura 2.4 muestra un ejemplo de fibra monomodo

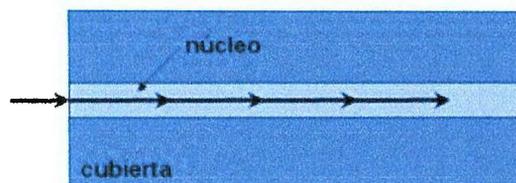


Figura 2.4 Relación de tamaño entre núcleo y cubierta.

2.3.4 Fibra multimodo con índice de refracción gradual

En el desarrollo de las fibras ópticas, los ingenieros se dieron cuenta de la gran capacidad de las fibras monomodo, pero a su vez encontraron la desventaja de la cantidad de señales que podían transmitir a través de estas debido a su minúsculo tamaño de sus núcleos. Como alternativa, crearon fibras multimodo cuyo índice de refracción varía gradualmente desde el núcleo hasta el revestimiento.

Un control cuidadoso en el gradiente del índice de refracción, permite que en las fibras multimodo de índice gradual los rayos de luz viajen a distinta velocidad, de tal modo que aquellos que recorran mayor distancia se propaguen más rápido, reduciéndose la dispersión temporal a la salida de la fibra.

La figura 2.5 muestra el comportamiento del índice de refracción de una fibra con núcleo de $62.5 \mu\text{m}$.

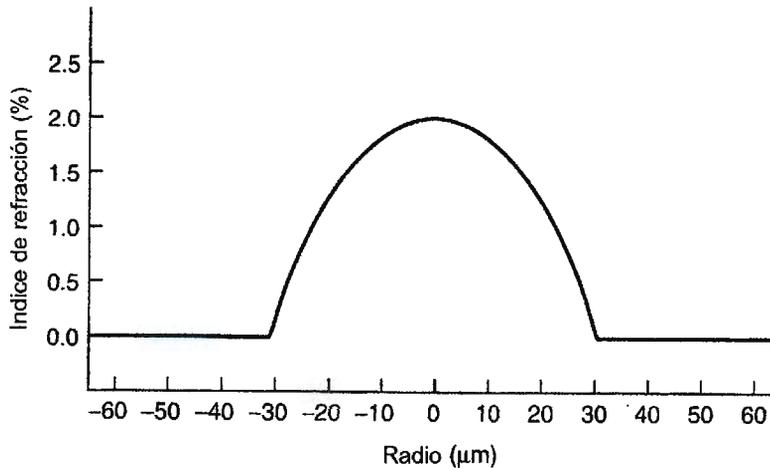


Figura 2.5 Índice de refracción de una fibra con un índice gradual y núcleo de $62.5 \mu\text{m}$ ⁽³⁾

El índice de refracción no cambia abruptamente en el límite del núcleo y revestimiento, lo que permite que no se de una reflexión interna total. Pero la variación en el índice de refracción permite mantener la luz dentro de la fibra.

2.3.5 Fibra monomodo de dispersión desplazada

Una de las características de las fibras monomodo a tomar en cuenta es la dispersión cromática, causada por la variación en la velocidad de la luz a través de la fibra. La dispersión cromática es la suma de 2 cantidades, la dispersión inherente al material y la dispersión de la estructura del guía onda. Estos dos valores poseen signos opuestos, dependiendo de la variación de la velocidad de la luz respecto a la longitud de onda. La figura 2.6 muestra el comportamiento de este valor.

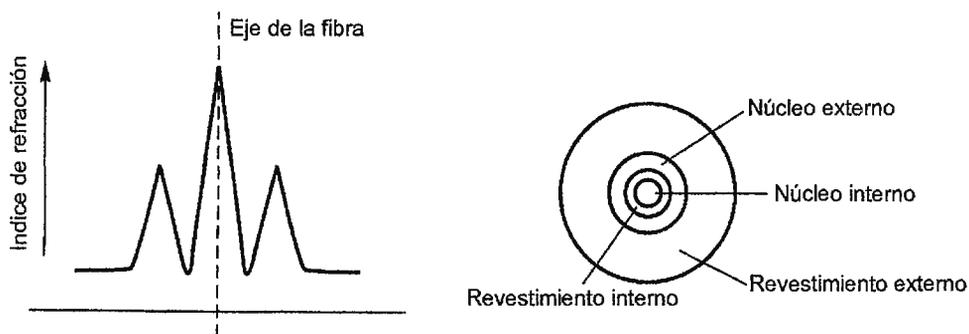


Figura 2.6 Índice de refracción de una fibra con dispersión desplazada ⁽³⁾

Mediante la modificación geométrica del perfil del índice de refracción, se puede conseguir desplazar la longitud de onda de dispersión nula a tercera ventana, surgiendo de este modo las fibras de dispersión desplazada. Sus pérdidas son ligeramente superiores (0,25 dB/km a 1550 nm), pero su principal inconveniente proviene de los efectos no lineales, ya que su área efectiva es bastante más pequeña que en el caso de la fibra monomodo estándar.

2.3.6 Fibra de dispersión desplazada nula

La primera fibra con dispersión desplazada posee dispersión nula a los 1550 nm. Esto se consigue incrementando la dispersión como se muestra en la figura 2.7

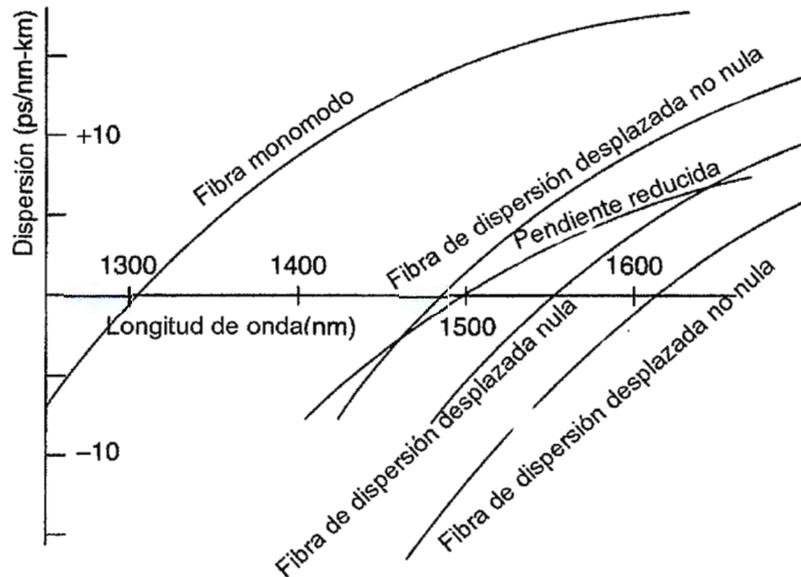


Figura 2.7 Representación del índice de refracción de diferentes tipos de fibra ⁽³⁾

Estas fibras fueron introducidas a mediados de los 80's y fueron originalmente conocidas como fibras de dispersión desplazada, pero en la actualidad se les cambió el nombre a fibra de dispersión desplazada nula debido a que el valor de dispersión es nulo en la mitad de la banda que utilizan los EDFA (Erbium doped fiber amplifier).

Los creadores de estas fibras incrementaron la dispersión adaptando nuevas capas al núcleo y al revestimiento como se muestra en la figura 2.6.

El núcleo interno posee un índice de refracción que decrementa su valor a medida que aumenta la distancia hacia el eje de la fibra. La siguiente capa llamada revestimiento interno, posee un índice de refracción que disminuye su valor a medida que el revestimiento externo lo aumenta. El núcleo externo varía su índice de

refracción de forma proporcional al valor del núcleo interno, pero alcanzando un nivel menor.

2.3.7 Fibra de dispersión desplazada no nula

Para resolver los problemas de no linealidades de la fibra de dispersión desplazada surgieron este tipo de fibras, que se caracterizan por valores de dispersión cromática reducidos pero no nulos. Esto se consigue sacando la longitud de onda con dispersión nula, fuera de la banda utilizada por los EDFA.

La nueva estructura que utiliza esta fibra se muestra en la figura 2.9.

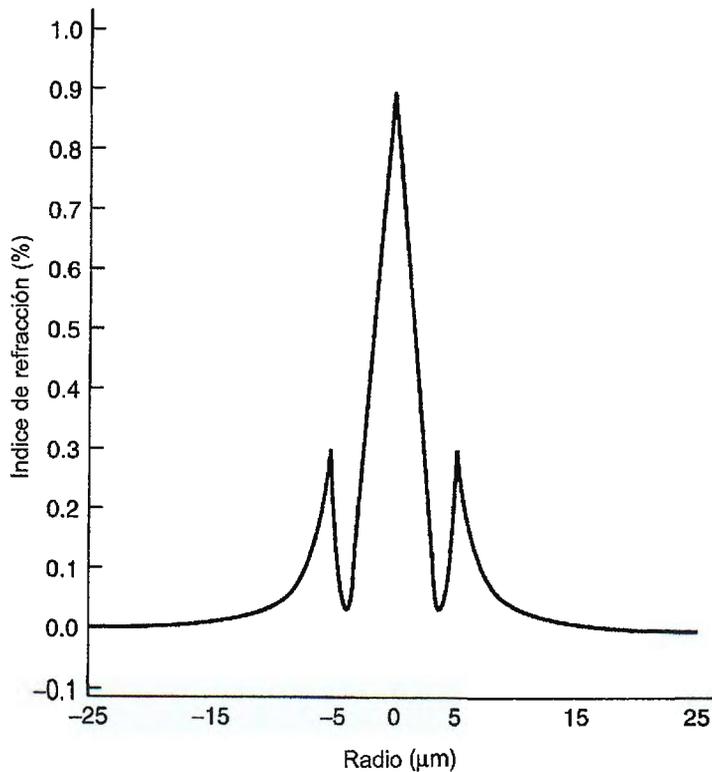


Figura 2.8 Índice de refracción de una fibra con dispersión desplazada no nula ⁽³⁾

En el mercado se pueden encontrar fibras con valores de dispersión tanto positivos (NZDSF+) como negativos (NZDSF-), con el fin de ser utilizadas en sistemas de gestión de dispersión. En la recomendación ITU G.655 se puede encontrar información sobre este tipo de fibras. Algunos ejemplos de este tipo de fibras serían: LEAF (Corning), True-Wave (Lucent) y Teralight (Alcatel).

2.3.8 Fibras con curva de dispersión reducida

Este tipo de fibra reduce el nivel de dispersión en relación a las longitudes de ondas utilizadas pero reduce el área efectiva a utilizar.

2.3.9 Fibras compensadoras de dispersión

Este tipo de fibra tiene como característica principal un valor de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de una fibra estándar. Poseen una gran diferencia en los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento, lo que les permite pequeñas áreas efectivas. Posee una atenuación aproximada de 0.5 dB/Km.

2.3.10 Fibra retenedora de polarización

Es una variación de la fibra monomodo, diseñada para permitir la propagación de una sola polarización de la señal entrante. Es utilizada en dispositivos sensibles a la polarización, como por ejemplo moduladores externos.

Estas fibras se basan en introducir deformaciones geométricas al núcleo durante la fabricación.

2.3.11 Fibra óptica de plástico

Este tipo de fibras fueron creadas con el objetivo de proveer soluciones a bajo costo, para realizar conexiones en distancias cortas, como por ejemplo: al interior de dispositivos, conexiones domesticas, etc. Se caracterizan por tener valores de pérdidas de 0.15 a 0.2 dB/m para una longitud de onda de 650 nm y un ancho de banda reducido como consecuencias de su gran apertura numérica. Los diámetros del núcleo se encuentran en el orden de 1mm.

Tienen como ventajas un manejo sencillo y mayor robustez.

2.3.12 Fibra de cristal fotónico

Recientemente ha surgido un nuevo tipo de fibra de silicio, que posee como característica principal una microestructura compuesta por agujeros de aire que se extiende a lo largo de la fibra.

Este mecanismo de transmisión denominado intrabanda, presenta una serie de propiedades únicas que las hace diferentes a las otras fibras. Dentro de algunas de estas propiedades se pueden destacar la posibilidad de construir las con núcleos de tamaños muy pequeños para aumentar los efectos no lineales, así como con bandas de propagación monomodo muy extensas. La dispersión cromática de estas fibras puede ajustarse mediante el diseño adecuado de su geometría.

2.4 Características matemáticas

El desempeño de la fibra óptica depende de los principios básicos de la interacción entre la luz y la materia.

Lo que nosotros conocemos como luz es solo una pequeña parte del espectro electromagnético.

El mundo de la óptica posee su propia unidad característica, se utiliza unidades métricas para describir la longitud de onda de una señal, usualmente se presentan en micrómetros (μm ó 10^{-6} m) y en nanómetros (nm ó 10^{-9} m).

La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia y se representa de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{Fórmula 2.5}$$

Donde c es la velocidad de la luz, λ la longitud de onda y ν es la frecuencia.

Otra característica que se puede definir es la energía de un fotón en la fibra óptica, que se puede obtener utilizando la ley de Planck, que se representa como:

$$E = h\nu \quad \text{Fórmula 2.6}$$

Donde h es la constante de Planck

$$6.63 \times 10^{-34} \text{ J-s} \quad \text{ó}$$

$$4.14 \times 10^{-15} \text{ eV-s}$$

Y ν representa la frecuencia. Generalmente es mas utilizada la siguiente fórmula

$$E(\text{eV}) = \frac{1.2399}{\lambda(\mu\text{m})} \quad \text{Fórmula 2.7}$$

La fórmula 2.7 representa el valor de la energía de un fotón en unidades de electrón-

voltio cuando la longitud de onda se mide en micrómetros.

Otra característica práctica, consecuencia del desempeño de la luz, es que la onda posee una propiedad llamada fase, la cual mide la posición del ciclo de la onda. La figura 2.9 muestra esta característica.

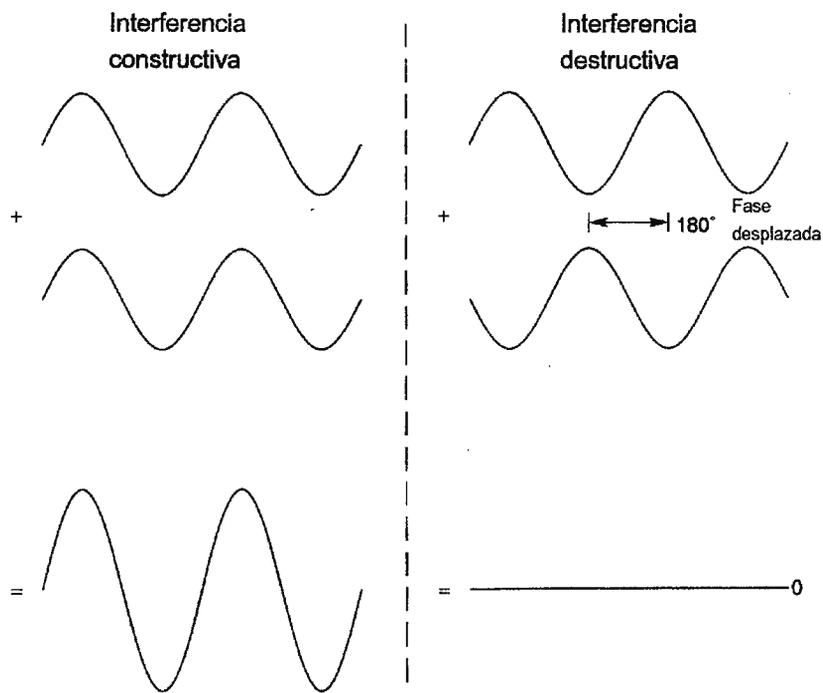


Figura 2.9 Relación entre las interferencias ⁽³⁾

La fase es importante, ya que define en que forma se afectaran dos señales.

2.4.1 Atenuación de la fibra

La atenuación de la fibra óptica indica la cantidad de luz que se pierde entre la entrada y la salida de un medio.

Este efecto está relacionado con el acoplamiento de la luz a la fibra, la absorción entre otros. Existen también otros tipos de efectos que pueden causar importantes valores de atenuación como lo puede ser una fuga de luz en la fibra, provocado por alteraciones físicas y mecánicas a la fibra.

La atenuación limita la distancia que puede recorrer una señal dentro de la fibra óptica, antes de que la luz transmitida se vuelva demasiado débil para ser detectada.

Podemos describir el efecto de la atenuación de la siguiente forma; cuando se inserta una señal a la fibra con una potencia P_0 , una fracción de esa potencia, ΔP , es la perdida. Lo que significa que solo

$$P_0 - \Delta P \quad \text{Fórmula 2.8}$$

es la potencia que entra a la fibra. Al estar dentro de la fibra, la luz sufre los efectos de la absorción y las que el medio le proporciona, tomando en cuenta la longitud. Si la perdida por absorción por unidad de longitud es representada por α y la perdida por choque de la luz con partículas de la fibra por unidad de longitud es representada por S , la fracción de luz q sobra es

$$1 - \alpha - S \quad \text{Fórmula 2.9}$$

Finalmente, para calcular el valor de potencia de la luz después de recorrer una distancia D , utilizamos

$$P(D) = (P_0 - \Delta P)(1 - [\alpha + S])^D \quad \text{Fórmula 2.10}$$

Esta fórmula indica la suma de la atenuación causada por el efecto de absorción y por el efecto del choque de la luz con las partículas de la fibra; indica también que la atenuación solo afecta a la luz que entra a la fibra, ya que otra porción de la luz se

pierde a la entrada.

2.4.1.1 Cálculo de la atenuación en decibeles

La atenuación mide la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida, y es generalmente representada por:

$$dB(\text{atenuación}) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \right) \quad \text{Fórmula 2.11}$$

La potencia de salida siempre será menor que la potencia de entrada, por lo que el resultado de la fórmula 2.11 será negativo sino se incluye un signo negativo.

El cálculo se vuelve más simple si se conoce el valor de atenuación por unidad de longitud y el tamaño del tramo de fibra del cual se quiere obtener

$$dB/\text{kilómetros} \times \text{distancia} \quad \text{Fórmula 2.12}$$

Si todas las unidades son las mismas podemos generalizar el cálculo a:

$$P_{\text{salida}} = P_{\text{entrada}} - \text{perdida}(dB) \quad \text{Fórmula 2.13}$$

Como ejemplo, considerando que la pérdida a la entrada de la fibra es de 3dB y el cálculo es para 6km de fibra con una pérdida de 0.5 dB/km. Si el valor de potencia de entrada es de 0 dBm, la salida será

$$P_{\text{salida}} = 0 \text{ dBm} - 3 \text{ dBm} - (6 \text{ km} \times 0.5 \text{ dB/km}) = -6 \text{ dBm}$$

2.4.2 Absorción

Cada material tiene la capacidad de absorber cierta cantidad de energía lumínica. El nivel de absorción dependerá también de la longitud de onda y el tipo de material con el que se interactúe.

El efecto de absorción es uniforme, una porción de materia compuesta por el mismo material absorbe la misma cantidad de luz a una longitud de onda.

La absorción también es acumulativa, lo que indica que depende también de la cantidad de material con el que se interactúa. Por lo que podemos concluir que un material absorberá la misma fracción de luz por cada unidad de longitud.

Por ejemplo, si el valor de absorción es de 1% por centímetro, significa que el material absorbe 1% de la luz en el primer centímetro, el 1% de la luz remanente en el siguiente centímetro y así sucesivamente.

Si el único factor que afecta a la luz es la absorción, la fracción de luz que se absorbe por unidad de longitud es α y la distancia total es D, la fracción de luz remanente después de recorrer una distancia D es:

$$(1 - \alpha)^D \quad \text{Fórmula 2.14}$$

Como ejemplo, después de pasar a través de 1m (100cm) de vidrio, la fracción de luz remanente será:

$$(1 - 0.01)^{100} = 0.366 \quad \text{ó} \\ 36.6\%$$

2.4.3 Scattering

Átomos y otras partículas inevitablemente desvían la luz que choca contra ellas, al viajar dentro de la fibra óptica. En este caso la luz no es absorbida sino que es enviada en otra dirección. En la figura 2.10 se describe este efecto.

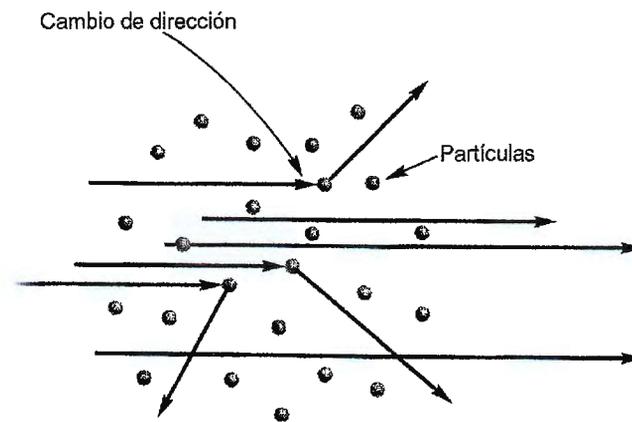


Figura 2.10 Choque de partículas con un rayo de luz

Al igual que la absorción, este efecto es uniforme y acumulativo. La relación es la misma para la luz que se absorbe, pero en este caso la fracción de luz que choca con las partículas se describe como S .

$$\text{Luz remanente} = (1 - S)^D \quad \text{Fórmula 2.15}$$

Este tipo de choque no depende específicamente del tipo de material, sino del tamaño de las partículas relativas a la longitud de onda. Entre más cercano este el valor de la longitud de onda al tamaño de la partícula, este efecto será más notable.

El efecto de choque con las partículas se incrementa cuando la longitud de onda λ disminuye. Para un material sólido y transparente, este fenómeno descrito en dB por kilómetros es dada por:

$$A\lambda^{-4} \quad \text{Fórmula 2.16}$$

Donde A es una constante que depende del tipo de material.

A la suma de los dos efectos antes mencionados se le conoce como pérdida total o atenuación y se mide en decibeles por kilómetro.

Se puede representar de la siguiente forma

$$P(D) = (P_0 - \Delta P)(1 - A)^D \quad \text{Fórmula 2.17}$$

Donde A es la atenuación por unidad de longitud, P_0 es la potencia inicial y ΔP es la pérdida por acoplamiento.

2.4.4 Variación espectral

La variación espectral depende básicamente de la composición de la fibra y el valor de la atenuación varia en relación a la longitud de onda también relacionado al tipo de material que constituye.

La mayoría de fibras monomodo utilizadas para las telecomunicaciones buscan longitudes de onda entre 1280 nm y 1650 nm, donde se presenta un valor de atenuación por debajo de 0.5 dB/km, exceptuando una zona conocida como pico de agua donde puede alcanzar valores de 1 dB/km. Generalmente las longitudes de onda que se utilizan son a 1310 nm y las regiones desde 1530 nm a 1620 nm donde también basan su funcionamiento los amplificadores ópticos basados en fibras dopadas con erbio. En la actualidad los constructores de fibra óptica han logrado

eliminar la zona del pico de agua para poder utilizar un espectro más amplio de longitud de onda, desde los 1280 nm hasta los 1650 nm.

La relación entre longitud de onda y atenuación se muestra en la figura 2.11

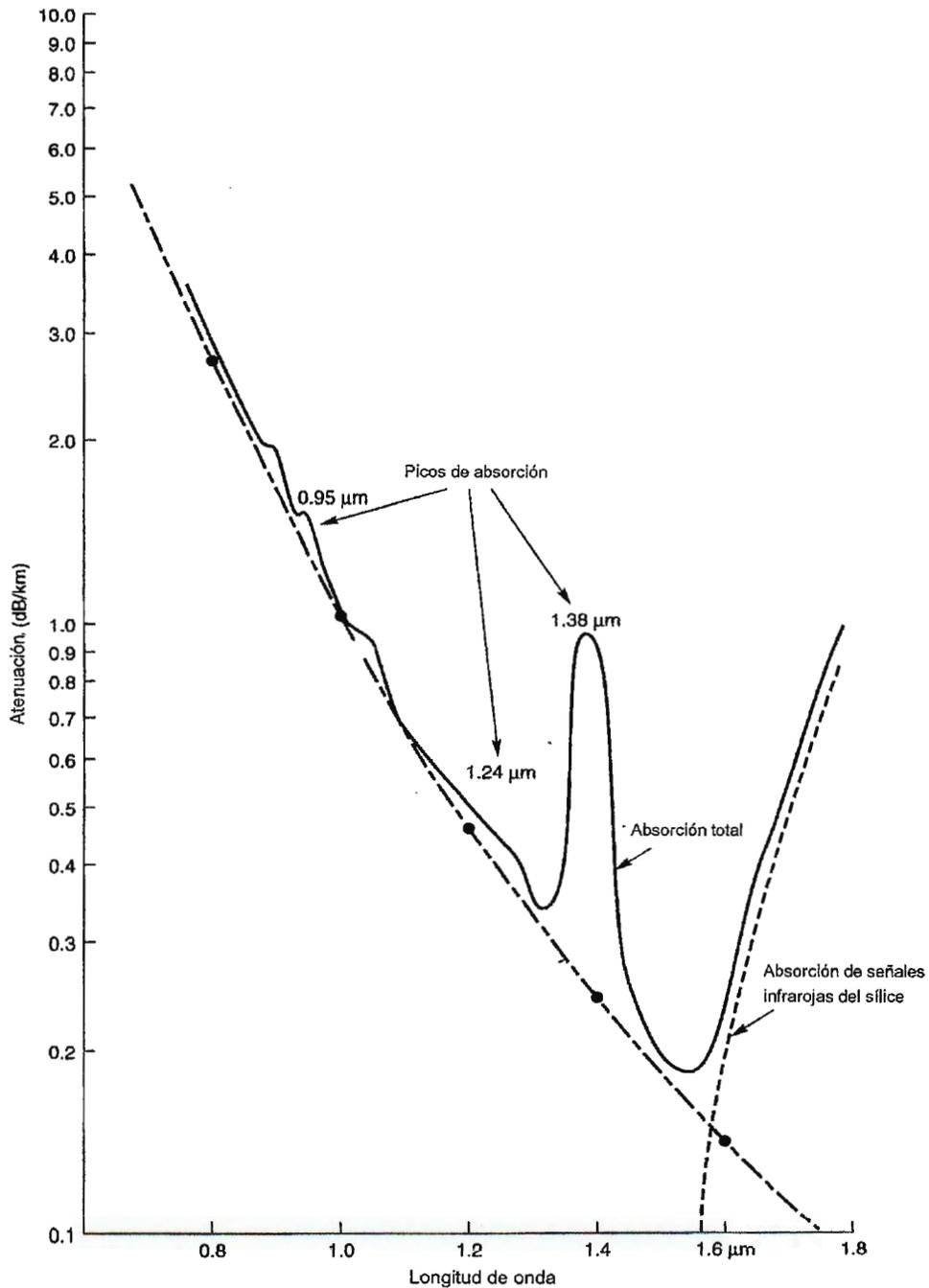


Figura 2.11 Atenuación total ⁽³⁾

2.4.5 Tamaño del núcleo y área efectiva

El núcleo es una de las partes importantes dentro de la estructura de la fibra óptica, y el tamaño es muy relevante al momento de acoplar la fuente emisora de luz con el hilo de fibra óptica.

El tamaño del núcleo determina la capacidad de la fibra de poder captar luz y la facilidad de poder alinearla con la fuente emisora de luz, en la figura 2.12 se muestra el efecto de una buena y mala alineación con la fuente emisora de luz. En el caso de que la fuente de luz y la fibra óptica no se encuentren alineadas la mayor parte de luz generada por la fuente escapa de la fibra a través del revestimiento.

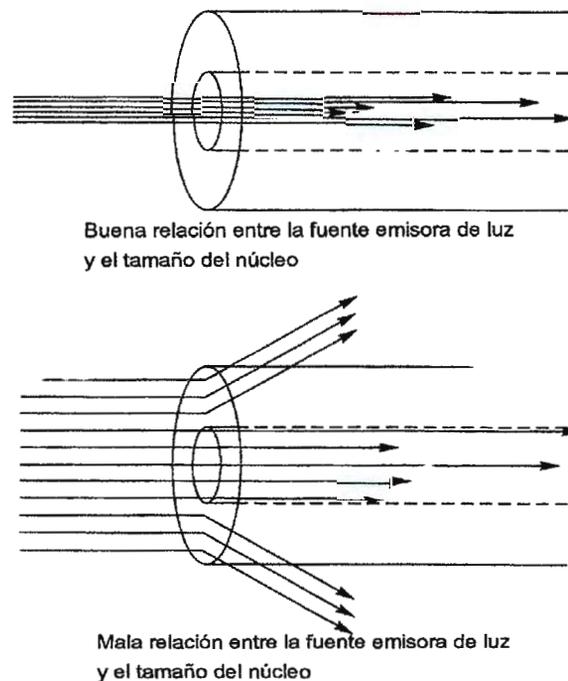


Figura 2.12 Acople de la señal óptica y la fibra ⁽³⁾

2.4.6 Apertura numérica

Un segundo factor q influye en la cantidad de luz que puede ser captada por la fibra óptica es el rango de ángulos con el que la luz puede entrar al núcleo de la fibra. Este valor se extiende por encima y debajo del eje de la fibra. Lo anterior se expone en la figura 2.13.

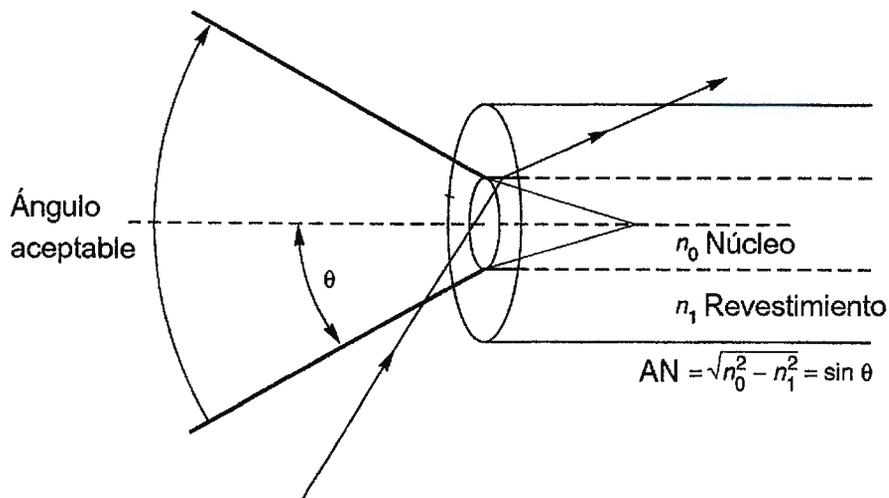


Figura 2.13 Apertura numérica ⁽³⁾

La relación de estos ángulos se conoce como apertura numérica y se representa como AN. Para ángulos pequeños el NA es el seno de la mitad del ángulo aceptable θ .

Para fibras con índice de refracción escalonado, el NA se define como:

$$NA = \sqrt{(n_0^2 - n_1^2)} = \text{sen} \theta \quad \text{Fórmula 2.18}$$

Donde n_0 es el índice de refracción del núcleo y n_1 es el índice de refracción del revestimiento.

Cada tipo de fibra posee una fórmula para obtener el valor de apertura numérica

El diámetro del núcleo no tiene relevancia dentro de la fórmula de la apertura numérica, pero la incidencia del rayo de luz debe ser dentro del ángulo aceptable para que la luz puede entrar al núcleo y viajar a través de la fibra óptica.

2.4.7 Dispersión

La dispersión es la forma en que los pulsos de luz viajan a través de la fibra óptica. Esta relacionado con la velocidad que desarrolla la luz al interior de la fibra, la longitud de onda que se utiliza y el modo de propagación. Los cambios en la velocidad a la que viaja la luz dentro de este medio son mínimas, pero al igual que los efectos de atenuación, son acumulativos en relación a la distancia.

Los cuatro tipos principales de dispersión son: modal, la que presenta el material, la relacionada a la longitud de onda y la polarización.

El efecto de la dispersión puede limitar la distancia que puede recorrer una señal, pero lo hace de una forma diferente. La dispersión no debilita la señal, la desvanece. Si se envía un pulso de luz cada nanosegundo, pero cada uno de estos tarde 10 ns en recorrer la fibra, todos los pulsos se desvanecen entre si; al final de la fibra la señal estará presente, pero será tan desvanecida que no podrá ser interpretada.

La dispersión mide la duración de un pulso que es transmitido por la fibra por unidades de distancia, pueden representarse en ns/kilómetros o en ps/kilómetros. El tiempo que se tarde el pulso en viajar se representa como Δt .

$$\Delta t = \text{dispersión (ns/km)} \times \text{distancia (km)} \quad \text{Fórmula 2.19}$$

La ecuación anterior también se utiliza para la dispersión modal, que es la más utilizada en fibras multimodo con índice de refracción escalonado, donde las señales viajan a diferentes velocidades.

Se puede obtener el valor total del tiempo que tarda el pulso en viajar, aplicando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados tiempo para una dispersión modal, el cuadrado de la dispersión cromática, y la dispersión por polaridad, así:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{modal})^2 + (\Delta t_{cromatica})^2 + (\Delta t_{polaridad})^2} \quad \text{Fórmula 2.20}$$

Para fibras multimodo, la dispersión por polaridad es despreciable, por lo que la fórmula 2.20 se vuelve:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{modal})^2 + (\Delta t_{cromatica})^2} \quad \text{Fórmula 2.21}$$

De igual forma, las fibras monomodo no poseen dispersión modal, por lo que la fórmula es:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{cromatica})^2 + (\Delta t_{polaridad})^2} \quad \text{Fórmula 2.22}$$

2.4.7.1 Dispersión cromática y guía onda

La dispersión cromática depende del rango de longitudes de onda que se utilice para transmitir una señal. Se presenta generalmente en picosegundos (para el tiempo de duración del viaje del pulso o ensanchamiento de éste), por nanómetros (que representa el ancho utilizado en el espectro por la señal) por kilómetros (que representa la longitud de la fibra). El tiempo total de duración del pulso bajo el efecto

de dispersión cromática, $\Delta t_{\text{cromático}}$, es calculado multiplicando el valor de dispersión cromática característico de la fibra por el rango de longitudes de onda, $\Delta\lambda$, generadas por la fuente de luz y la longitud de la fibra.

$$\Delta t_{\text{cromática}} = \text{dispersión cromática}(\text{ps/nm-km}) \times \Delta\lambda (\text{nm}) \times \text{Longitud de la fibra (km)}$$

La dispersión cromática se refiere al retardo (deformación) espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La fibra óptica convencional tiene un coeficiente de dispersión positivo; Esto quiere decir que a mayores longitudes de ondas se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra comparado con las longitudes de ondas cortas. Este diferencial de retardo hace que el pulso se deforme.

En la transmisión digital, un pulso esta formado de una serie de longitudes de ondas, cada uno de ellas viajando a diferentes velocidades dependiendo de las propiedades del vidrio. En tramos largos de fibra la dispersión cromática puede dar por resultado pulsos que se deforman de tal manera que se sobrelapan, causando interferencia inter- simbólica, en el receptor que ve incrementado la tasa de error. El efecto de interferencia inter simbólica se origina por el sobrelapamiento de pulsos y se puede ver en la figura 2.14.

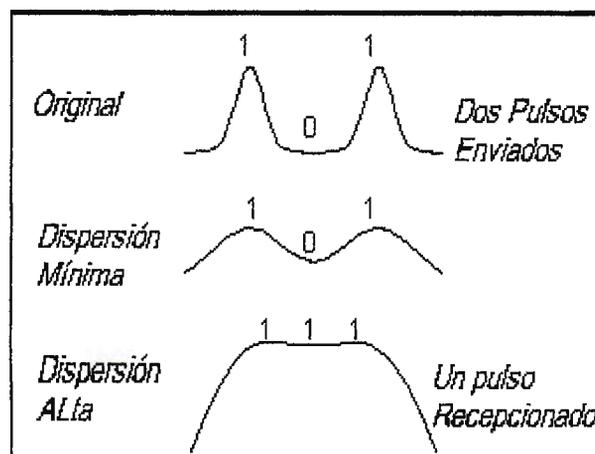


Figura 2.14 Interferencia simbólica ⁽⁴⁾

El efecto de la dispersión cromática es el resultado de combinar los efectos de la dispersión que posee el material y la dispersión de guía onda. La velocidad de la luz (ó el índice refractivo) en un cristal de silicio, es dependiente de la longitud de onda de la señal que se transmite. El efecto de la dispersión del material se presenta como el ensanchamiento de un pulso óptico debido a las velocidades diferentes de las frecuencias ópticas que conforman el pulso.

La dispersión de guía onda representa las diferencias de velocidad de la señal que dependen de la distribución de la potencia óptica presente en el núcleo y el revestimiento. A medida que la frecuencia de la señal disminuye, la mayor parte de la señal se transporta en el revestimiento, el cual posee un índice de refracción diferente al que presenta el núcleo.

La figura 2.15 representa las curvas de la dispersión del material la dispersión por guía onda.

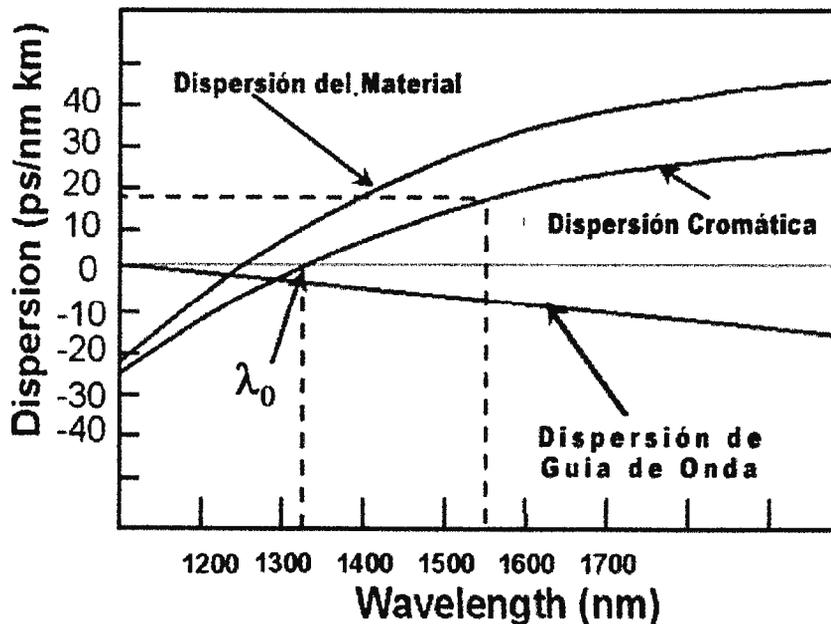


Figura 2.15 Dispersión cromática como resultado de combinar la dispersión del material y del guía onda ⁽³⁾

2.4.7.2 Dispersión modal

Este tipo de dispersión solo se presenta en fibras multimodo. Al momento de realizar una transmisión se introducen una serie de pulsos ópticos a la fibra, cada uno con una duración y un ancho de pulso, pero al momento de salir estos se ven modificados por efectos de la dispersión y aumenta de forma proporcional a la distancia.

La única forma de contrarrestar este efecto es utilizar fibras monomodo con un índice de refracción gradual.

De tal forma que se pueden utilizar las siguientes formulas para cada caso

$$\sigma_{\text{modal}} = \frac{AN^2L'}{2n_1c_0} \quad \text{Fórmula 2.23}$$

La fórmula 2.23 representa el valor de la dispersión modal para una fibra multimodo con un índice de refracción escalonado.

$$\sigma_{\text{modal}} = \frac{17.5AN_{(0)}^4}{n_{1(0)}^3c_0} \left[\frac{n_{1(0)} - n_2}{n_{1(0)}} \right]^2 L' \quad \text{Fórmula 2.24}$$

La fórmula 2.24 indica el valor de la dispersión modal para una fibra multimodo con índice de refracción escalonado.

Para las formulas anteriores γ representa un factor de corrección, cuyo valor está entre 0.5 y 0.8.

2.4.7.3 Dispersión de polarización

Debemos recordar que una señal de luz, dentro del campo eléctrico se compone por dos modos perpendiculares entre si, ambos viajando en la misma fibra.

Los modos de polarización pueden ser descartados si estos son exactamente iguales, pero en la realidad esto no es cierto. La única forma que el comportamiento de estos dos modos es que la fibra sea completamente simétrica, por lo que no puede ser aplicado a un modelo real. Las diferentes fuerzas a las que se ve enfrentada la fibra provocan cierto tipo de deformidad que elimina por completo la simetría.

El efecto de este tipo de dispersión es tal que crea una diferencia de fase entre cada una de las polaridades, así como se muestra en la figura 2.16

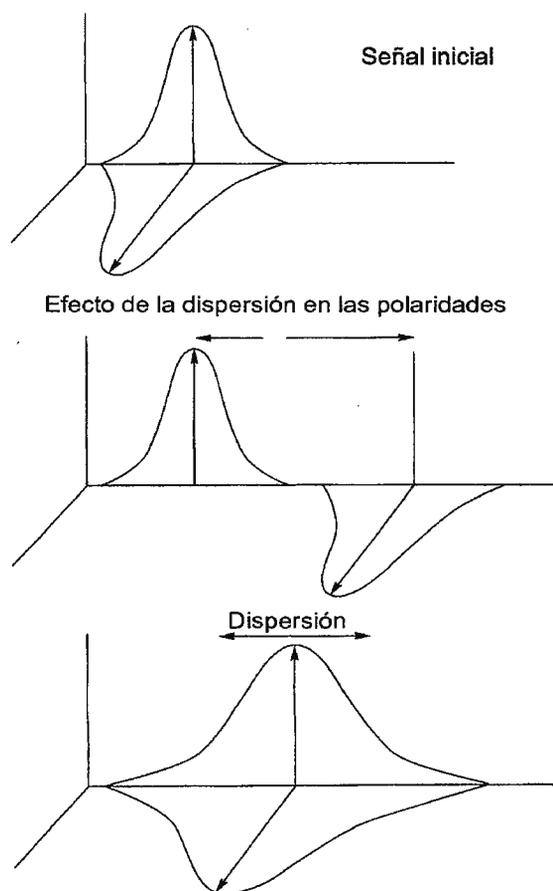


Figura 2.16 Polaridad versus dispersión ⁽³⁾

CAPITULO III

TÉCNOLOGIAS APLICABLES A LA FIBRA ÓPTICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA HASTA EL HOGAR

3.1 Amplificadores ópticos

La distancia siempre ha sido un problema para cualquier tipo de señal que viaja en un medio a través de cualquier medio. Las señales se debilitan cuando viajan por cualquier tipo de cable, entre más lejos se quiera enviar la señal, ésta se vuelve más débil y puede causar problemas al momento de recibirla e interpretarla. Los sistemas de comunicación tratan de evitar este problema implementando etapas de amplificación de la señal a lo largo del camino, de tal forma que al potenciar una señal débil ésta puede avanzar más en distancia.

Muchos amplificadores o repetidores pueden ser ubicados en secuencia, de tal forma que a medida que la señal se vuelva débil pueda ser amplificada nuevamente.

Por los capítulos anteriores se sabe las diferencias entre la fibra óptica y los cables coaxiales. Las señales ópticas pueden alcanzar mucha más distancia que una señal que viaja a través de un cable coaxial.

Existen amplificadores, repetidores y regeneradores que pueden ser aplicados a un enlace de fibra óptica y cada uno de estos desempeñan funciones diferentes.

- Un amplificador óptico es un dispositivo que trabaja en su totalidad la parte óptica utilizando el principio del láser para incrementar la potencia de la señal óptica. Este es un dispositivo análogo, por lo que la señal que se encuentra a la entrada es la misma que se obtiene a la salida amplificada en intensidad y posiblemente con cierta cantidad de ruido adicionado por el proceso. Si la señal es ruidosa o no está completamente limpia a la entrada del dispositivo

es casi probablemente que la amplificación no sea exitosa. Debido a que los amplificadores dejan la señal en su estado original, luz, un simple amplificador tiene la capacidad de poder amplificar de forma simultanea docenas de canales en un sistema de multiplexación de señales por división de longitud de onda.

- Un repetidor óptico es un dispositivo opto-electrónico el cual convierte una señal óptica en una señal electrónica, luego utiliza ese estado de la señal para enviarla a un transmisor, el cual repite la señal a la entrada. Al pensar en un transmisor es necesario pensar en una etapa de recepción, y es de esa forma como funciona este dispositivo. En sistemas digitales, la etapa de recepción por lo general incluye un proceso de limpieza de la señal.
- Los regeneradores poseen un proceso distinto para poder limpiar la señal digital por medio de la remoción de ruido y distorsión, regenerando y amplificando una versión limpia de la señal. Al igual que los receptores digitales, los regeneradores poseen circuitos de discriminación que examinan la señal decidiendo que parte de la señal son datos válidos y que parte es ruido. Los regeneradores son dispositivos digitales que remueven el ruido de la señal y recrean la señal.

En la práctica es un poco complicado diferenciar repetidores de amplificadores. Antes de que los amplificadores ópticos fueran creados, la única forma de poder transmitir señales ópticas era utilizando repetidores. Cuando salieron al mercado los amplificadores la necesidad del uso de repetidores casi se elimino.

De cualquier forma la señal debe ser limpiada después de pasar a través de una serie de amplificadores ópticos.

Una de las mayores desventajas de los regeneradores opto-electrónicos es que para el uso en sistemas de multiplexación de señales, debe utilizarse uno de estos dispositivos por cada canal de longitud de onda.

3.1.1 Tipos de amplificación

Se debe profundizar un poco en la diferencia entre los amplificadores ópticos y los dispositivos opto-electrónicos.

Los amplificadores electrónicos u opto-electrónicos convierten una señal óptica débil en una señal electrónica, procesando la señal electrónicamente y utilizando otro transmisor óptico, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.1

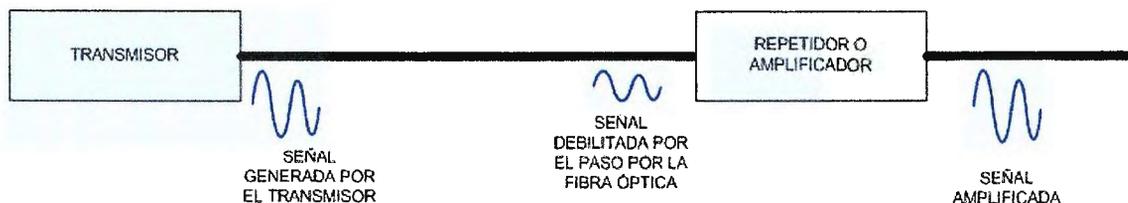


Figura 3.1 Esquema del trayecto de una señal

En contraste, un amplificador toma una señal débil a la entrada y la amplifica generando una señal fuerte a la salida, la figura 3.3 muestra un diagrama básico de un amplificador óptico. Este dispositivo no convierte en ningún momento el estado de la señal, sino que la deja siempre en forma de luz.

Los amplificadores ópticos son simples en concepto como en funcionamiento, poseen menos componentes que los repetidores opto-electrónicos. Existen dos ventajas importantes de un amplificador óptico sobre un regenerador opto-electrónico. Un amplificador puede manejar diferentes longitudes de onda al mismo tiempo, sin causar interferencia entre estas. Debido a que los receptores no pueden distinguir entre longitudes de onda tan cercanas en sistemas WDM es necesario

demultiplexar o separar las longitudes de onda antes de pasar a la etapa de recepción, esto aplicado a los repetidores opto-electrónicos. Otra ventaja de los amplificadores ópticos frente a los opto-electrónicos es que no son sensibles a los cambios de velocidad de la señal o a la tasa de transferencia de datos, en el caso de los opto-electrónicos existen modelos diferentes para cada tipo de señal.

Se debe tomar en cuenta que los amplificadores ópticos no pueden regenerar las señales, es decir que no poseen la capacidad de limpiar la señal o compensarla por el efecto de dispersión que se presenta durante la transmisión de la información.

Existen dos tipos de amplificadores ópticos, amplificadores con fibras dopadas y amplificadores basados en semiconductores.

Los amplificadores mas utilizados son los que se basan en fibras dopadas de erbio.

3.1.2 Configuraciones para la amplificación

Las señales ópticas pueden necesitar ser amplificadas en diferentes puntos de una red de comunicación, así como se muestra en la figura 3.2.

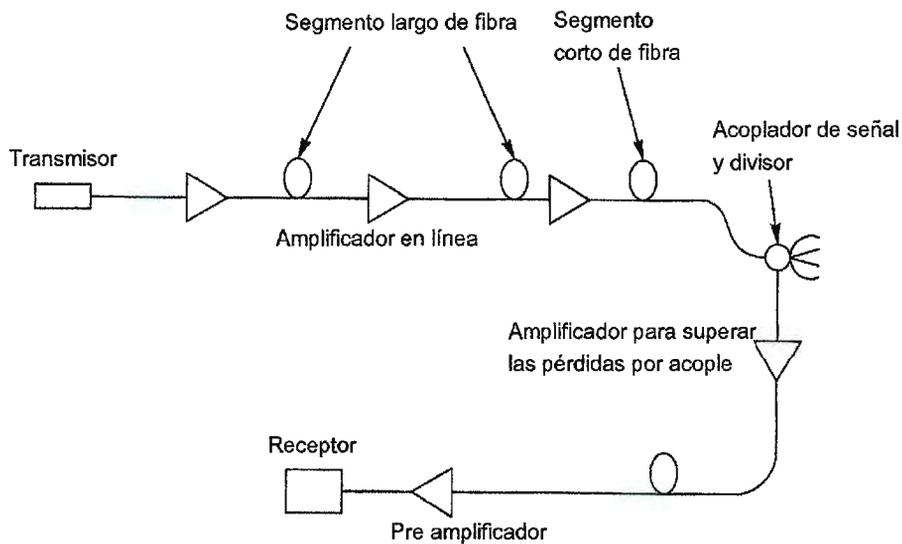


Figura 3.2 Diferentes aplicaciones para un amplificador dentro de una red de comunicación. (3)

- Post amplificación: se da cuando un amplificador se posiciona después de un transmisor para incrementar la potencia señal que será transmitida a través de la fibra. La ventaja de este tipo de configuración, es que provee la capacidad a un enlace para poder ser separado en diferentes caminos manteniendo una buena calidad en la señal.
- Amplificación en línea es utilizada para compensar la señal frente atenuaciones altas al recorrer largas distancias. El objetivo de la configuración es amplificar lo suficiente la señal para que esta pueda recorrer otra distancia considerable en el enlace. Es utilizada por lo general en enlaces en el que la señal pasa por muchos acopladores, conectores o puntos de interconexión.
- Preamplificación: es utilizada para amplificar una señal débil justo antes de ser procesada por un receptor.

3.2 Repetidores opto electrónicos y regeneradores

Un repetidor opto electrónico o un regenerador de señal, están básicamente compuestos por un receptor y un transmisor conectados uno al otro y puestos dentro de un mismo dispositivo. A la entrada de estos equipo se requieren las características de una señal básica a la entrada de un receptor, a su salida se obtienen parámetros que usualmente se obtienen a la salida de un transmisor. Entre las dos etapas anteriores generalmente la señal es limpiada y amplificada.

La demanda de los repetidores y regeneradores de señal fue de gran nivel antes que se construyeran los amplificadores ópticos. Los dispositivos mas modernos son utilizados en sistemas que de interconexión, donde se reciben señales de diferentes lugares, la señal se conmuta, se reconoce y procesa, para luego ser distribuida nuevamente.

A continuación algunas características principales de los dispositivos repetidores y regeneradores.

- Los repetidores y regeneradores son diseñados para operar a una velocidad de transmisión y otros parámetros específicos. Pueden llegar a contener circuitos generadores de reloj que especifican la velocidad de transferencia de la información
- La regeneración de una señal puede ser muy útil en sistemas que necesitan recorrer largas distancias, donde el ruido y la dispersión pueden anular la señal.
- Los dispositivos de regeneradores usualmente se limitan a sistemas digitales, donde no se puede ignorar la relación entre la señal y el ruido.

3.3 Amplificadores de fibra dopada de erbio

Este tipo de amplificadores es que tiene el mayor nivel de uso en sistemas ópticos, en general es conocido como EDFA por sus siglas en ingles, Erbium Doped Fiber Amplifier. Operan las longitudes de onda comprendidas entre 1530 nm y 1620 nm.

La figura 3.3 muestra la composición básica de uno de estos amplificadores.

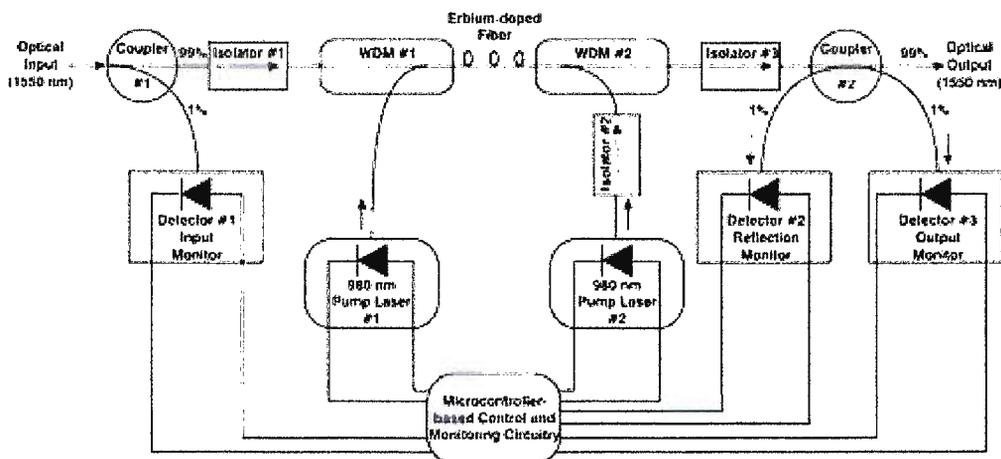


Figura 3.3 Diagrama de bloques representando un EDFA ⁽⁵⁾

La fibra que utiliza este tipo de amplificador, se encuentra dopada con erbio cuya estructura atómica permite amplificar la luz.

La figura 3.3 describe un amplificador de fibra dopada con erbio, que utiliza láser a 980 nm o 1480 nm para inyectar energía a la fibra dopada. Cuando una señal utilizando como longitud de onda de 1310 nm o 1550 nm, ingresa al amplificador, la luz de esta señal es detectada y activa una etapa de estimulación de la fibra dopada, liberando su energía en forma de luz incrementando la potencia de la señal original.

La entrada del acoplador 1, permite al microcontrolador monitorear la señal de entrada utilizando el detector 1. Luego de ser dividida en porcentajes, la señal original pasa por una etapa de aislamiento, que en la figura se describe como aislador 1. La etapa WDM 1 permite acoplar la señal que proviene del láser a 980 nm con la señal que viaja en la fibra dopada, además logra acoplar la señal de entrada

del amplificador a la fibra dopada con menores pérdidas ópticas. La etapa WDM 2 se encuentra en amplificadores de doble etapa que repiten el proceso anterior, adicionando más energía y potencia al proceso. Luego se utiliza el acoplador 3 para distribuir un porcentaje de la señal al microcontrolador para monitorear la potencia de salida. El detector 2 se utiliza para monitorear el valor de reflexión que regresa hacia el amplificador.

3.3.1 Niveles de potencia y ganancia

El nivel de ganancia utilizado en un amplificador y la potencia de salida dependen de la potencia de entrada como también de las características ópticas del amplificador.

La potencia de entrada es el punto inicial para el amplificador, por lo que este nivel debería de estar dentro de un margen de operación para no afectar el desempeño del dispositivo. La señal de entrada debe estar por encima del nivel del ruido de fondo para establecer una buena relación con el nivel de la señal, esto debido a que los amplificadores son dispositivos análogos que amplifican en conjunto con la señal de entrada, el ruido de fondo de la señal. Un nivel muy alto de señal de entrada puede causar la saturación del amplificador.

La ganancia representa el nivel de amplificación en decibeles. Es la función de la interacción entre la señal de entrada y el diseño del amplificador. El nivel de ganancia es alto si la señal de entrada tiene baja potencia.

La figura 3.4 muestra la relación entre la señal de entrada, la ganancia y la señal de salida.

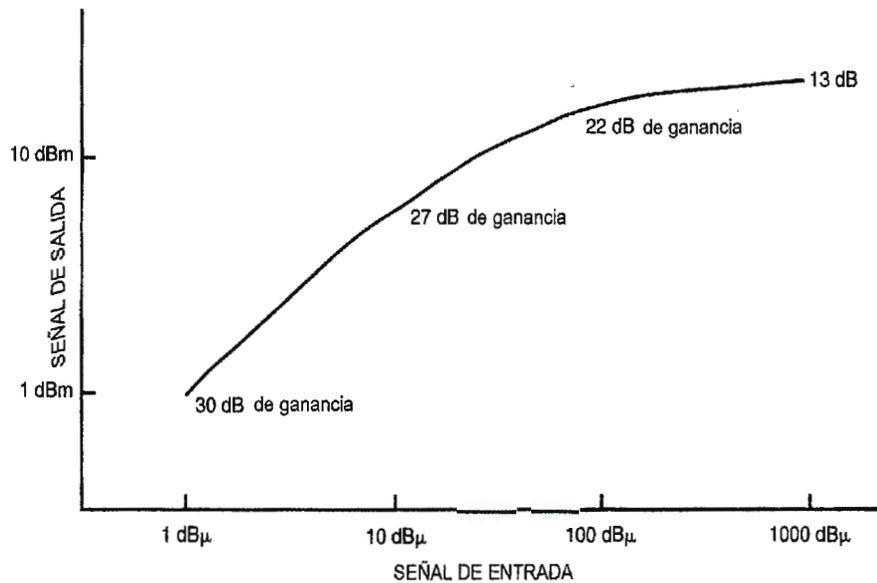


Figura 3.4 Señal de salida – Señal de entrada ⁽³⁾

La potencia de salida del amplificador se representa por la siguiente fórmula

$$P_{salida} = P_{entrada} + ganancia \quad \text{Fórmula 3.1}$$

3.3.2 Longitudes de onda

Los amplificadores que se utilizan fibras dopadas con erbio utilizan un amplio rango de longitudes de onda. La figura 3.5 muestra una gráfica de la señal que puede ser amplificada a diferentes longitudes de onda. Representa también la probabilidad de que un fotón de esa longitud de onda pueda estimular la emisión de luz de un átomo de una fibra dopada. De la gráfica se puede destacar que pequeñas señales de entrada proveen un mayor nivel de ganancia.

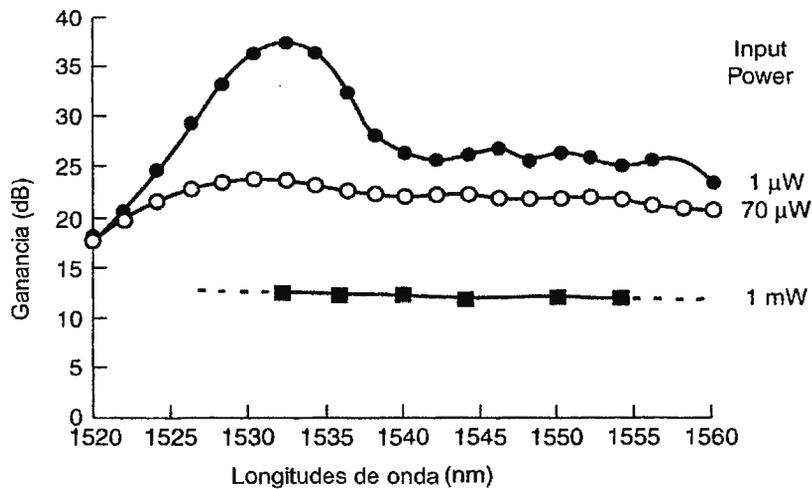


Figura 3.5 Rango de trabajo ⁽³⁾

Los amplificadores basados en fibras dopadas, aportan poca ganancia a grandes longitudes de onda que se encuentran entre 1565 nm y 1620 nm.

Se han construido diferentes tipos de amplificadores para que se acoplen a las diferentes tipos de aplicaciones. Los amplificadores de banda C usualmente trabajan desde los 1530 nm hasta 1565 nm, utilizando muchos metros de fibra dopada. Los amplificadores para banda L, son los mas recientes en tecnología y el rango de trabajo en longitud de onda esta siendo establecido aun. La mayoría de amplificadores de banda L operan desde los 1570 nm hasta 1610 nm.

3.4 Emisión espontánea y aporte ruido de un amplificador

Comportándose como cualquier dispositivo analógico, los amplificadores ópticos también amplifican cualquier señal de ruido que venga junto a una señal valida.

Estos equipos, debido a su proceso de amplificación también generan un ruido de fondo que se denomina emisión espontánea amplificada.

La emisión espontánea amplificada se presenta en todo el rango de longitudes de onda operativas para el amplificador, así como se muestra en la figura 3.6.

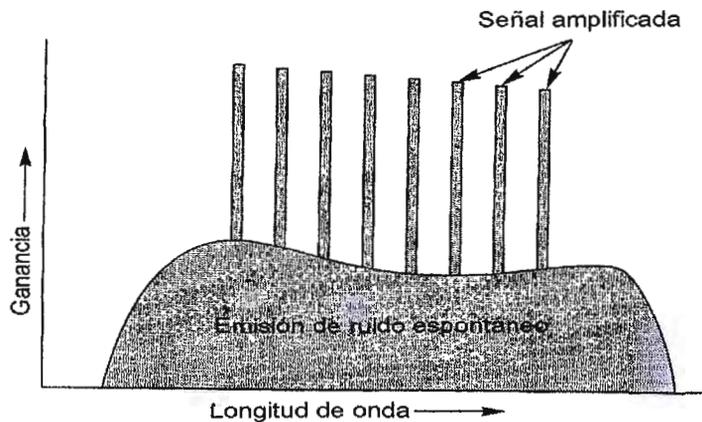


Figura 3.6 Emisión espontánea amplificada de ruido para un amplificador óptico. ⁽³⁾

En la tabla 3.1 se muestran las longitudes de onda en las que trabajan los amplificadores ópticos, recalcando las bandas C y L para el uso de fibras dopadas.

Nombre de la banda	Significado	Longitudes de onda (nm)
Banda O	<i>Original</i>	1260 – 1360
Banda E	<i>Extended</i>	1360 – 1460
Banda S	<i>Short</i>	1460 – 1530
Banda C	<i>Conventional</i>	1530 – 1565
Banda L	<i>Long</i>	1565 – 1625
Banda U	<i>Ultra long</i>	1625 – 1675

Tabla 3.1 Bandas de funcionamiento para amplificadores ópticos ⁽³⁾

3.5 Amplificadores por efecto de Raman

Los amplificadores por efecto de Raman utilizan el efecto que provoca una partícula que se encuentra vibrando al momento de absorber la energía lumínica, volviendo liberar la misma energía que fue absorbida y adicionando la energía por el efecto de vibración.

Los amplificadores de Raman utilizan láseres de bombeo para estimular la emisión de energía y de esta forma convertir la fibra óptica en un medio de transmisión de banda ancha y ganancia distribuida. La fibra actúa como un amplificador óptico proporcionando ganancia sobre las señales que viajan en su interior. Por lo general los amplificadores de Raman se utilizan de tal forma que su señal de bombeo, para estimular la liberación de energía y así amplificar la señal, son inyectadas en contra de la propagación, es decir en sentido contrario a las señales que se transmiten o desde el final del tramo de fibra. Asegurando de esta forma que el mayor efecto de amplificación se da al final del trayecto, donde los niveles de señal son más bajos.

De igual forma que los *EDFA*, la amplificación por efecto Raman aporta ruido al sistema; en este caso se conoce a este aporte de ruido como figura de ruido efectiva. Estos amplificadores reducen los efectos de ruido y mejoran la relación señal a ruido óptico del sistema. En estos dispositivos pueden obtenerse figuras de ruido efectivas menores a 3 dB o incluso negativas, valores que no se pueden conseguir en sistemas que utilizan amplificadores con fibras dopadas de erbio. En general, aumentando la ganancia Raman se consiguen figuras efectivas de ruido inferiores, si bien existe un límite. Si se aumenta en exceso la ganancia, se producen problemas en la fibra asociados al *scattering* de Rayleigh. A medida que aumenta la ganancia, se dispersa mayor potencia de señal en el interior de la fibra, apareciendo señales que se propagan en sentido contrario. Por lo que este efecto también genera una nueva reflexión de esta onda que puede llegar a crear errores en el receptor.

Los amplificadores de Raman dependen de la polarización, por lo que las señales polarizadas ortogonalmente a la fuente de amplificación no experimentan ganancias.

A pesar de que el principio fundamental de diseño de un amplificador Raman es sencillo – cada longitud de onda de bombeo Raman proporciona ganancia a una frecuencia 13,5 THz inferior – las interacciones entre las longitudes de onda Raman y las señales *DWDM* pueden resultar complicadas. La complejidad proviene del hecho de que los mismos canales *DWDM* pueden actuar como bombeos de Raman para otras señales de longitudes de onda superiores, a pesar de su nivel de potencia óptica mucho más reducido. Esto crea múltiples regiones de ganancia Raman 13,5 THz por debajo de la frecuencia de cada señal (unos 100 nm en tercera ventana). En sistemas convencionales que solamente transportan señales en la banda C (1530-1560 nm), estas interacciones no tienen demasiada influencia. Sin embargo, la situación es distinta cuando se utiliza amplificación de Raman en presencia de canales tanto en banda C como en banda L. En este caso, los bombeos de Raman de banda C pierden mucha potencia en amplificar los bombeos de Raman de banda L. Al mismo tiempo, los canales de banda C proporcionan cierta amplificación a los canales de banda L. El resultado es una cierta pendiente en la potencia óptica de los canales (menor potencia a longitudes de onda más cortas y mayor potencia a longitudes de onda más largas) que se necesita ecualizar. Por ello, los bombeos de Raman de banda C requieren una mayor potencia que los de banda L. Y esto se debe tener en cuenta incluso en el caso de un sistema que solamente transmita señales en banda C, pues en el futuro se limitaría el uso de la banda L si las fuentes de bombeo no tuvieran capacidad para generar potencias superiores. Adicionalmente, la interrelación entre las potencias de los bombeos y las señales *DWDM* obliga a ajustarlas en el caso de modificar la potencia de alguno de los bombeos.

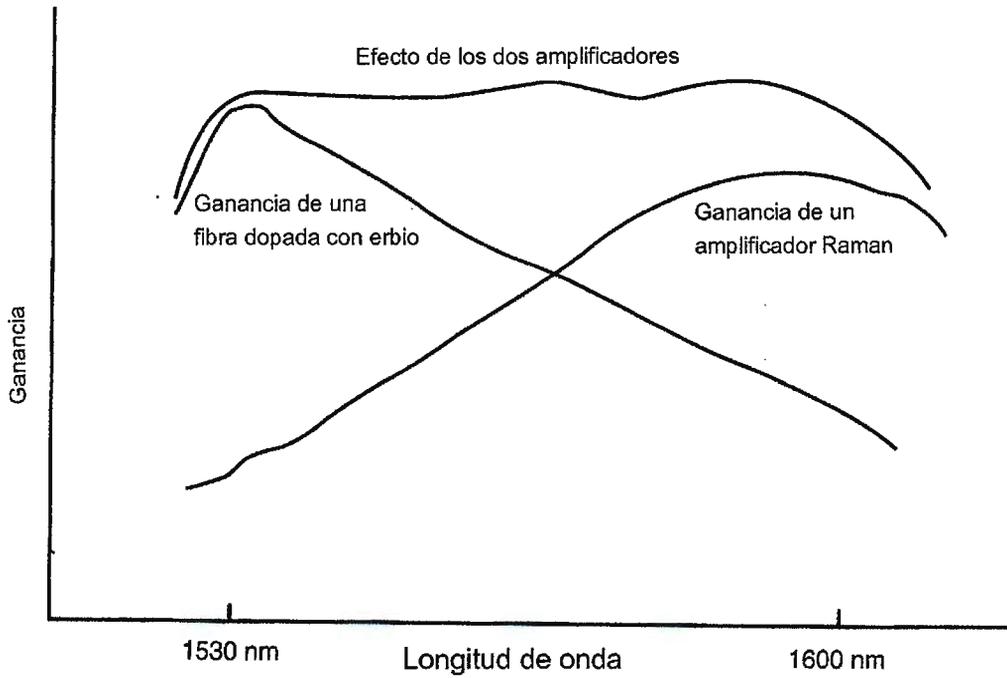


Figura 3.7 Desempeño de los amplificadores de Raman y *EDFA*. ⁽³⁾

La figura 3.7 muestra la curva de desempeño de los amplificadores basados en fibras dopadas con erbio y los amplificadores que utilizan el efecto Raman. ⁽²⁹⁾

Característica	EDFA	Raman
Amplificación de Banda	Las bandas "C" y "L"(alrededor de 1550nm); no trabajan en el rango de 1300nm.	Depende de la disponibilidad de bombas de longitud de onda; funciona en todas las bandas.
Ganancia	20db ó más dependiendo de la concentración de los iones, la longitud de la fibra y la configuración de las bombas.	De 4 a 11 db, proporcional a la intensidad de la bomba y la efectividad de la longitud de la fibra.
Potencia de saturación	Depende de la ganancia y las constantes del material.	Se aproxima a la potencia de las ondas de la bomba.
Ruido	Amplifica el ruido.	No amplifica el ruido.
Longitud de onda de la bomba	980 nm. ó 1480 nm.	Aproximadamente 100 nm más abajo que la longitud de onda de la señal en ganancia pico.
Número de amplificadores	Alrededor de 6.	Alrededor de 12.
Espaciamento	80 a 100 Km.	Alrededor de 65 Km.
Característica	Configuración Híbrida EDFA y Raman	
Número de amplificadores	Alrededor de 12.	
Espaciamento	80 a100 Km.	

Tabla 3.2 Comparación entre los amplificadores *EDFA* y los Raman ⁽⁶⁾

3.6 Amplificadores ópticos basados en semiconductores

Este tipo de amplificadores es conocido como *SOA*, *Semiconductor optical amplifier*, por sus siglas en ingles; se encuentran constituidos básicamente por diodos laser sin hacer uso de espejos. Este dispositivo recibe una señal a su entrada y transmite una versión amplificada a su salida. Poseen la capacidad de trabajar de forma bidireccional y su estructura física es pequeña, aventajando de esta forma a los amplificadores que utilizan fibras dopadas de erbio. Las desventajas de este tipo de amplificadores es el alto nivel de perdida por acople, son dependientes de la polaridad de la señal y poseen una alta figura de ruido.

Al igual que el láser, este tipo de amplificador puede trabajar en toda la region de longitudes de onda desde 1250 nm hasta 1675 nm. Los SOA tienen una alta ganancia por unidad de longitud. Por su tamaño puede ser integrado junto con otros dispositivos ópticos; de esta manera también pueden conmutar, controlar y convertir a otras formas las señales ópticas.

3.6.1 Características

Los amplificadores basados en semiconductores comparten características con otros amplificadores. Poseen una ganancia característica, la cual es alta en señales débiles a su entrada, pero pueden entrar en saturación en señales con altos niveles de potencia. Puede trabajar desde los 1250 nm hasta los 1675 nm.

Debido a la tecnología utilizada en su construcción, estos dispositivos pueden ser integrados con otros elementos ópticos.

Su estructura física se caracteriza por ser delgada y plana, utilizando una guía onda plana para transportar la fibra.

Dentro de su estructura, poseen una capa activa en la que circula una corriente que define si el amplificador se encuentra activo o no.

3.6.2 Limitantes

En los amplificadores basados en fibras es fácil transferir luz de una fibra a la otra. Para el caso de los amplificadores basados en semiconductores se vuelve fácil transferir la luz de una guía onda plana a otra. Una gran limitante de tipo de amplificadores es la pérdida de potencia que se da al transferir una señal de una guía onda plana a un hilo de fibra óptica.

La figura 3.8 muestra la limitante geométrica al acoplar un amplificador basado en semiconductores y un hilo de fibra óptica.

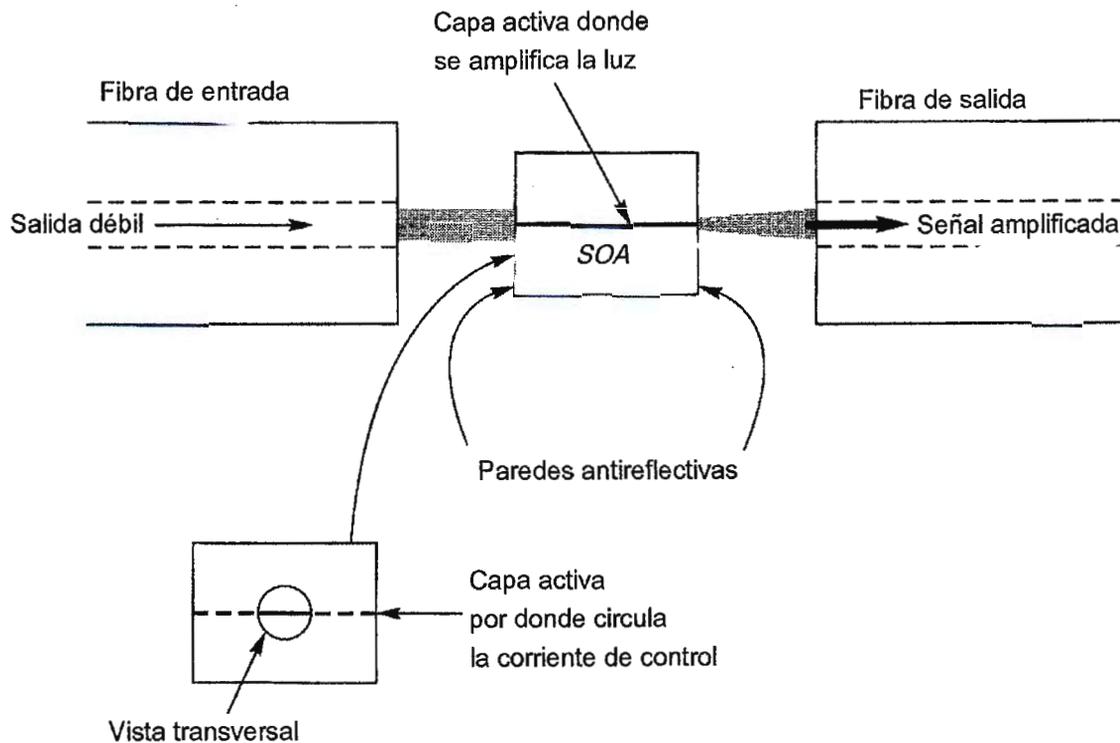


Figura 3.8 Acople entre la fibra óptica y un amplificador basados en semiconductores

(3)

El objetivo es enfocar la luz que proviene de un hilo de fibra óptica en la guía onda plana del amplificador para luego la señal amplificada enfocarla en el núcleo de la fibra óptica de salida.

Otra limitante se presenta en el modo de operación del amplificador. El problema es el alto nivel de ruido que aporta el proceso de amplificación de señal, siendo menor en los amplificadores basados en fibras dopadas.

La reflexión de luz al final del amplificador es otra importante desventaja. El alto índice de refracción que poseen los materiales semiconductores, hace difícil eliminar

la reflexión causada por los bordes de la estructura del amplificador. La reflexión puede introducir inestabilidades y ruido en el amplificador; este efecto se vuelve aun mas grave con señales débiles, ya que es en este caso cuando el amplificador puede aportar su mayor nivel de ganancia.

Una limitante adicional es la sensibilidad que tienen estos dispositivos con la polaridad de la señal de luz a la entrada, ya que la amplificación se da en diferentes proporciones según sea la polaridad de la luz.

3.6.3 Arquitectura

Se pueden construir guía ondas planos y otro tipo de componentes utilizando los mismos materiales que se utilizan para los transmisores láser y los amplificadores basados en semiconductores. Por lo que es posible integrar, dentro de la misma tarjeta de semiconductor, guía ondas planos en medio del resto de dispositivos.

La figura 3.9 muestra la forma en como se integran los dispositivos en un tarjeta de semiconductor.

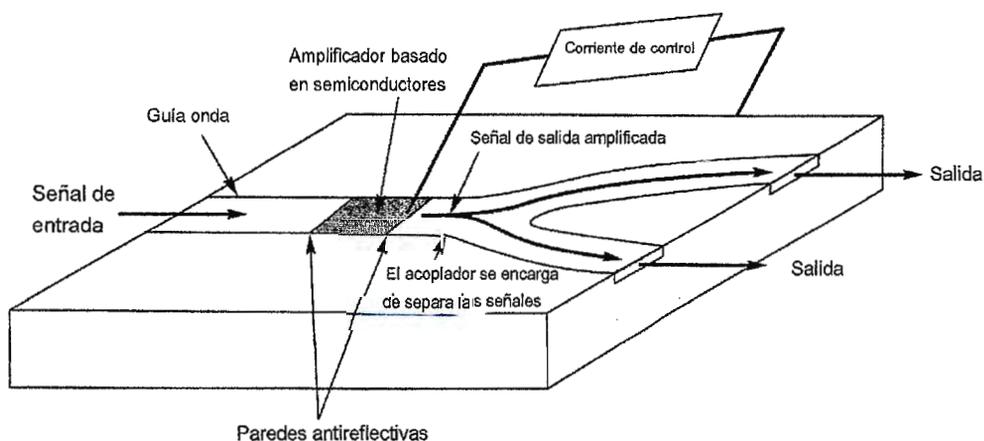


Figura 3.9 Amplificador óptico basado en semiconductores, integrado en un chip. ⁽³⁾

La etapa de amplificación dentro de la integración con otros dispositivos, difiere en dos cosas. La primera, la región utilizada para el amplificador se encuentra dopada para poder lograr un acople en la zona del guía onda, mientras que el resto de la tarjeta puede que no posean una unión p-n. La segunda diferencia, es que la zona diseñada para el amplificador, se aplica un voltaje lo cual ocasiona un flujo de corriente que permite la recombinación de moléculas en la capa de acople.

Cuando una señal débil pasa a través de la zona de amplificación, estimula las moléculas permitiendo la emisión y amplificación. Integrando el amplificador junto con el guía onda previene el efecto de reflexión al final de la zona de amplificación, además previene perdidas por acople si la luz se encuentra dentro del guía onda.

Los amplificadores responden rápidamente al cambio en el nivel de corriente que permite la recombinación de moléculas en su estructura. Por lo que haciendo uso de esta corriente se pueden agregar otras aplicaciones a los amplificadores basados en semiconductores.

Como se muestra en la figura 3.10, manejando el nivel de corriente que estimula a los semiconductores, un amplificador se puede utilizar también para conmutar su estado de encendido y apagado dando paso a una señal de luz de una forma específica.

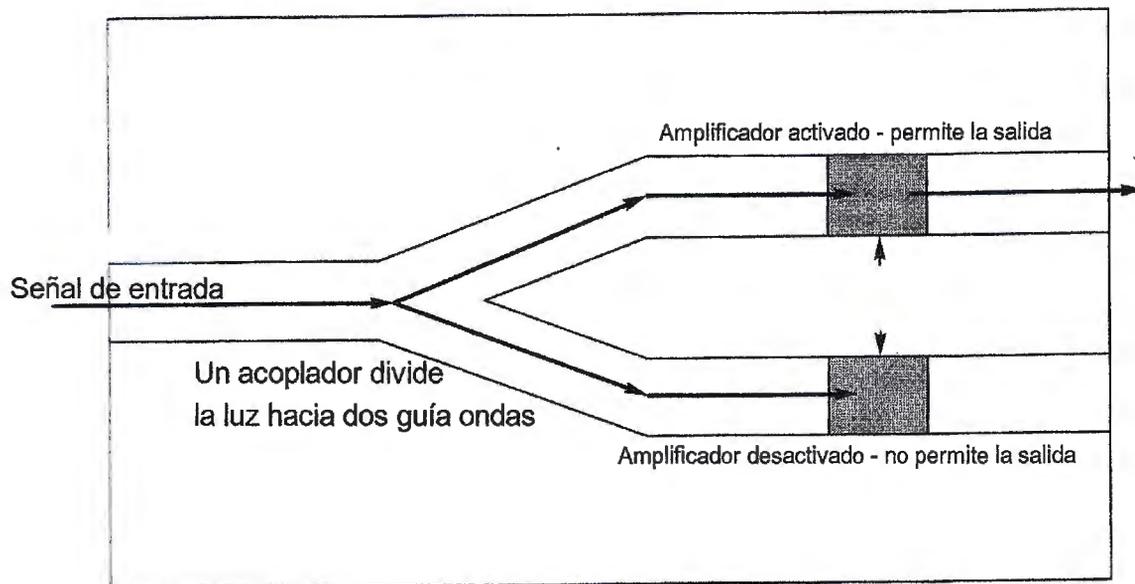


Figura 3.10 Amplificador basado en semiconductores utilizado como un conmutador de señales. ⁽³⁾

3.7 Multiplexación óptica por división de longitud de onda

La multiplexación óptica por división de longitud de onda se conoce en inglés como *Wavelength Division Multiplexing* o *WDM*. Esta tecnología permite multiplicar la capacidad de manejar señales en un sistema óptico pero a la vez agrega muchos otros requerimientos para que éste funcione adecuadamente.

Los componentes ópticos deben de estar capacitados para poder combinar y separar canales ópticos que se encuentran muy cercanos en longitud de onda.

Esta tecnología permite combinar señales ópticas dentro de un mismo hilo de fibra óptica y a su vez poder separarlas cuando sea necesario. Cada señal tiene asignada una longitud de onda diferente, evitando la interferencia de una señal con la otra.

3.7.1 Requerimientos para WDM

La aplicación más conocida para WDM, es transmitir muchas señales por un solo hilo de fibra óptica haciendo uso de diferentes longitudes de onda.

WDM requiere de la óptica para poder combinar las señales generadas por diferentes transmisores y luego separar cada uno de los canales ópticos para ser procesadas por diferentes receptores.

La cualidad de poder combinar muchas señales incrementa la capacidad de la fibra óptica, pero a la vez hace difícil la tarea de separar los canales.

3.7.1.1 Sistemas WDM

La figura 3.11 muestra un ejemplo de un sistema que utiliza la multiplexación de señales ópticas utilizando diferentes longitudes de onda.

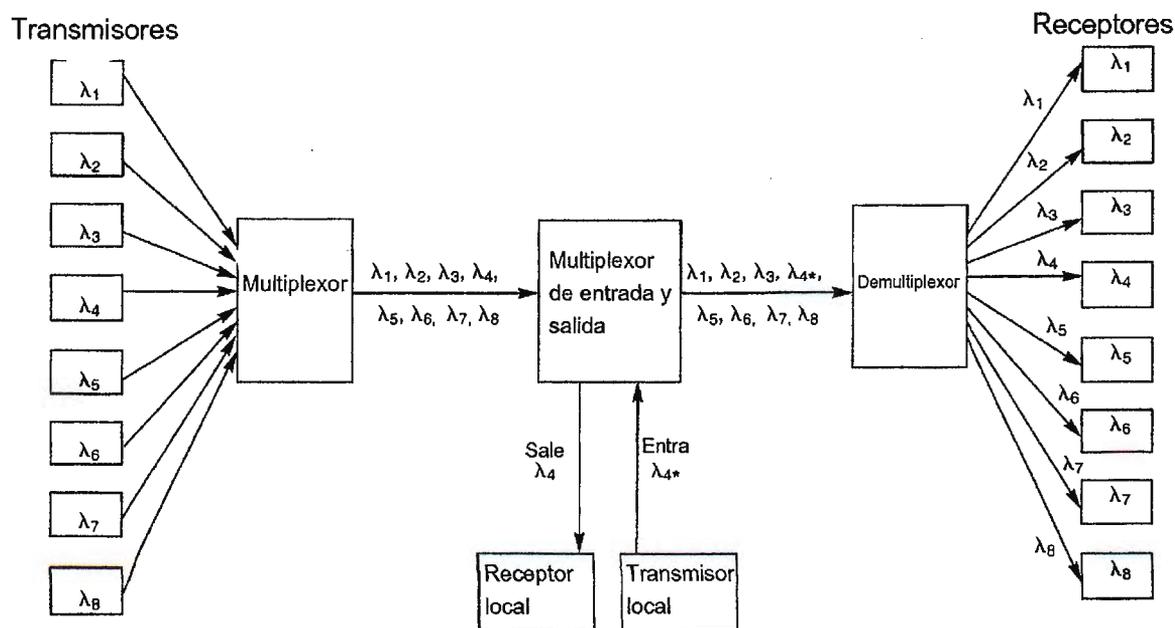


Figura 3.11 Sistema WDM con ocho canales ⁽³⁾

Utilizando como ejemplo la figura 3.11, tenemos 8 longitudes de onda diferentes que provienen de distintos transmisores, son combinadas en un multiplexor que se muestra a la izquierda de la figura. Las señales viajan a través de un hilo de fibra óptica común, para luego pasar a una sección donde se deriva una longitud de onda y puede ser agregada otra señal utilizando la misma longitud de onda.

Al lado derecho de la figura, las señales son separadas utilizando un demultiplexor y son guiadas a diferentes receptores, utilizando uno para cada señal o longitud de onda. Debido a la característica de los transmisores que no hacen diferencia entre longitudes de onda, una mezcla entre una longitud y otra podría ser interpretada por el receptor como una interferencia o ruido.

Las características de los dispositivos dentro de un sistema *WDM* deben ser tales que permitan a las señales poder viajar, combinarse y separarse sin afectarse unas con otras. Los multiplexores ópticos deben presentar un nivel bajo de pérdidas por inserción de señal y eliminar el efecto de *scattering* para impedir que alguna de las señales ópticas se vea reflejada hacia los transmisores.

Los demultiplexores deben permitir separar las señales íntegramente, presentando un bajo nivel de fuga entre un canal y el adyacente.

La etapa de multiplexación extra, provee diferentes aplicaciones. Una de ellas es poder agregar nuevas señales a un sistema *WDM* sin que estas nuevas interfieran con las ya existentes. También permite la extracción de señales previamente combinadas y que están siendo enviadas hacia otra localidad. En la figura 3.11 este ejemplo se muestra utilizando la longitud de onda cuatro o λ_4 , para sustituir la señal original por otra.

3.7.1.2 Densidad de los canales

La densidad que utiliza cada canal asignado a una longitud de onda en un sistema *WDM* es una de las variables principales dentro del desempeño y aplicaciones de estos sistemas. La óptica provee secciones uniformemente separadas para cada uno de los canales ópticos, aunque el sistema puede no utilizarlos todos. La distancia o espacio existente entre cada una de estas secciones determina la densidad del canal.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones ha definido frecuencias centrales que se encuentran separadas unas de otras por 1000 GHz, que corresponde a cerca de 8 nm para el caso de los amplificadores que utilizan fibras dopadas con erbio. Otros sistemas comerciales utilizan separaciones de 50 GHz. Algunos desarrolladores están utilizando espacios de 25 GHz y hasta 12.5 GHz, pero aun no se encuentra claro cuando saldrán al mercado estas tecnologías.

Por lo general, un espaciamiento de 200 GHz o menos es utilizado en sistemas que utilizan la tecnología denominada *Dense Wavelength division Multiplexing* o *DWDM* y en español, multiplexación por división de densidad de longitud de onda. Esta tecnología permite combinar mayor cantidad de longitudes de onda.

La figura 3.12 compara dos sistemas que utilizan multiplexación óptica, uno utilizando 40 canales separados por 100 GHz y otro con 4 canales separados por 1000 GHz, relativo a 8 nm.

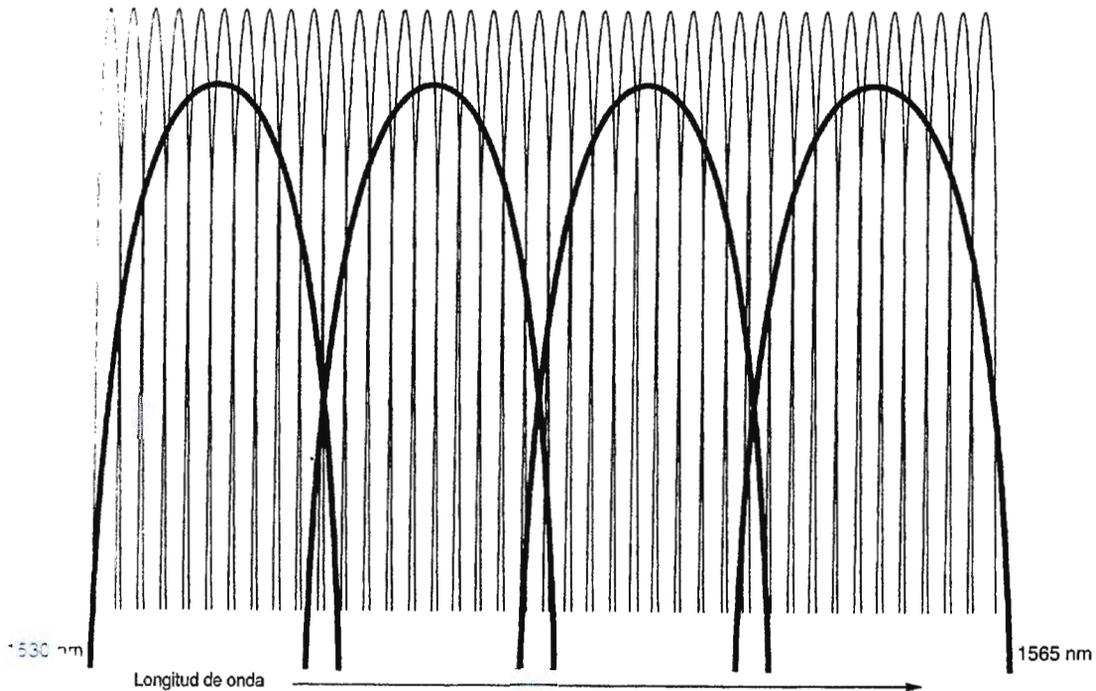


Figura 3.12 Separación de canales en un sistema *WDM* de 40 canales y 8 canales ⁽³⁾

3.7.1.3 Separación de los canales ópticos

El proceso de demultiplexar las señales especifica separar los canales ópticos de forma limpia, y permitiendo un alto nivel de aislamiento entre ellos. El nivel de aislamiento debe ser de 20 a 40 dB, por lo que la señal de un canal se verá atenuada en 20 o 40 dB antes de poder interferir en otro canal.

De las curvas que se muestran en la figura 3.12, las partes donde se observa traslape entre una curva y otra, son los puntos donde existe gran posibilidad de interferencia entre las señales o *crosstalk*. El nivel de interferencia dependerá del rango de longitudes de onda que son emitidas por el transmisor. Idealmente los transmisores son diseñados para que su emisión de luz ocupe un espacio muy

agudo en longitudes de onda, de tal forma que dejen un espacio considerable entre canales ópticos.

El rango de longitudes de onda emitidas por el transmisor dependerá del esquema de modulación que utilice y de la tecnología de su fuente emisora de luz.

La separación entre canales en algunos sistemas, se puede lograr dejando libres algunas secciones adyacentes en canales ópticos para evitar interferencia entre ellos. Como ejemplo el espacio dejado en amplificadores ópticos de banda C y banda L. Los amplificadores de banda C terminan el uso de longitudes de onda en 1565 nm y los de banda L inician el uso de longitudes de onda e 1570 nm dejando un espacio de 5 nm entre estos sistemas. Algunos sistemas *WDM* utilizan el mismo espacio entre canales.

3.7.1.4 Separación selectiva de canales

Un dispositivo demultiplexor separa cada uno de los canales ópticos en fibras ópticas individuales, pero en algunos casos solo se necesita separar solo uno o dos canales del resto. Este efecto se muestra en la figura 3.13.

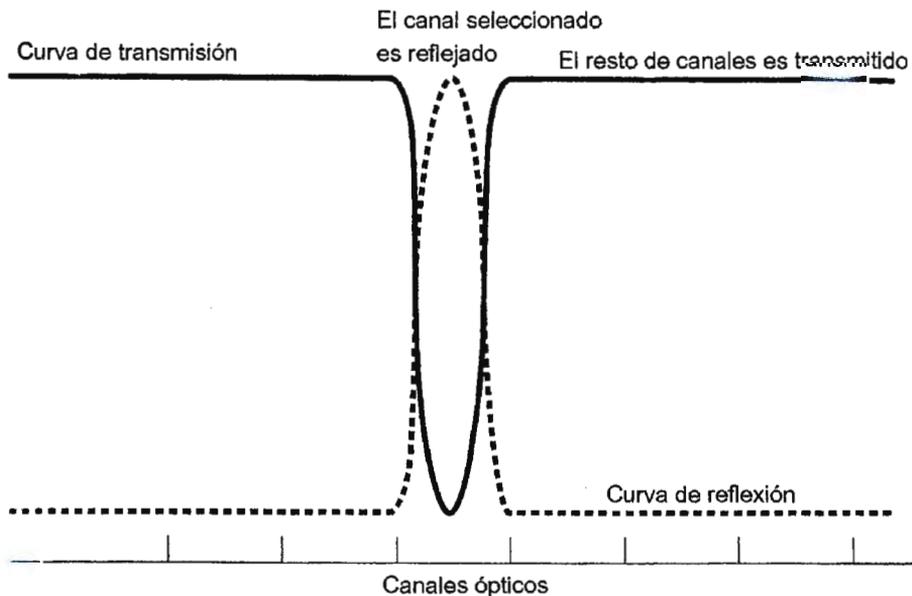


Figura 3.13. Separación selectiva de un canal óptico ⁽³⁾

Para poder eliminar un canal del resto, la señal óptica pasa a través de un dispositivo que brinda un tratamiento diferente a la señal del canal que se ha seleccionado. El efecto es el de un filtro que selecciona longitudes de onda.

Este filtro tiene la capacidad de poder eliminar un canal óptico y transmitir el resto de longitudes de onda. Por ejemplo si se desea que el filtro transmita un canal en específico, este reflejará el resto de canales ópticos. Otra aplicación es la que se representa en la figura 3.13 en la que se puede derivar un canal óptico para enviar la señal a un nodo en específico y dejarlo libre para poder utilizar esa longitud de onda. Otros dispositivos más complejos pueden eliminar y agregar canales, con la limitante que solo pueden utilizar la misma longitud de onda que se limpió previamente.

3.7.2 Arquitectura de dispositivos *WDM*

Filtros de interferencia y otro tipo de dispositivos pueden ser utilizados para combinar o separa canales ópticos o longitudes de onda en sistemas *WDM*.

Las aplicaciones de estos sistemas están muy relacionadas con filtros que eliminan longitudes de onda en específico para brindar paso a un canal óptico.

WDM utiliza filtros de interferencia para hacer pasar a través de éstos, las diferentes señales combinadas y empezar a separar cada una dependiendo la longitud de onda que éstas utilicen. La señal proveniente de la entrada del dispositivo demultiplexor, es enfocada para pasar a través de los filtros. Una vez se encuentran separadas las señales por cada uno de los filtros, nuevamente se enfoca cada señal para ser entregada a una fibra.

Filtros de interferencia que trabajan con longitudes de onda muy específicas, transmiten un canal óptico, mientras refleja el resto de longitudes de onda. Para completar el efecto en diferentes canales ópticos, los filtros son puestos en cascada, para ir separando una a una las longitudes de onda.

Se tomará la figura 3.14 para explicar el efecto al separa diferentes canales ópticos.

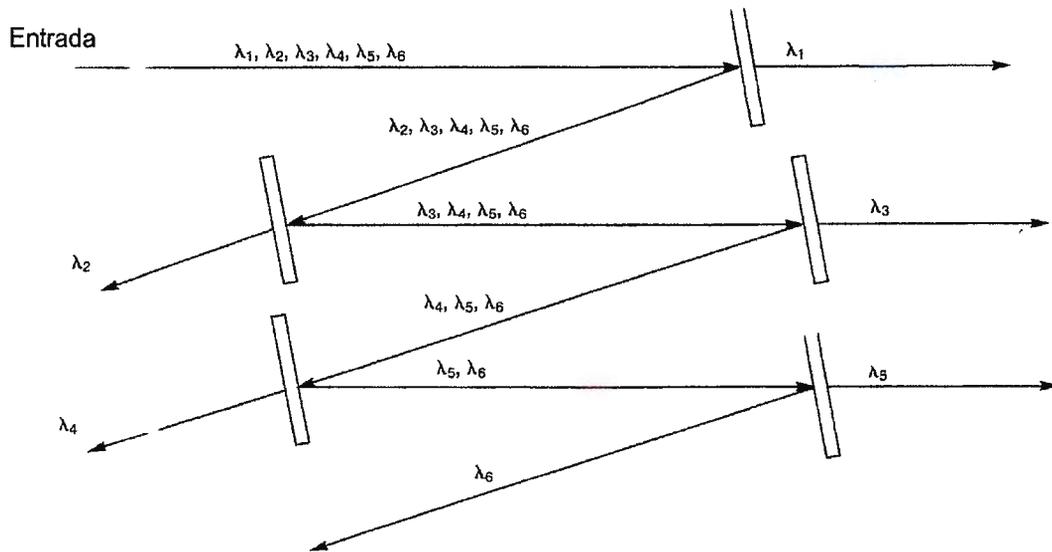


Figura 3.14 Filtros de interferencia separando diferentes longitudes de onda. ⁽³⁾

De la figura 3.14, el primer filtro transmite o deja pasar a través de él, la señal λ_1 mientras refleja el resto de canales. El resto de canales llegan al segundo filtro donde se transmite λ_2 , reflejando los otros canales. En general, se necesitan $n - 1$ filtros para aislar n canales ópticos.

En la práctica, el funcionamiento de los filtros no es del todo perfecto. En su funcionamiento ideal, éstos reflejan algunas señales y dejan pasar a través de ellos otras longitudes de onda, pero este efecto atenúa las señales reflejadas y al pasar por varios filtros, ya se vuelve crítico; para sistemas *WDM* con 8 canales ópticos el efecto no se vuelve un problema, pero para un sistema que trabaje con 16 longitudes de onda estas pérdidas pueden afectar en el desempeño de todo el sistema.

Para disminuir el efecto de este problema en sistemas que trabajen con grandes cantidades de longitudes de onda, las señales pueden ser divididas previamente en grupos para luego pasar por filtros que permiten el paso de altas y bajas longitudes de onda. Este sistema se representa en la figura 3.15

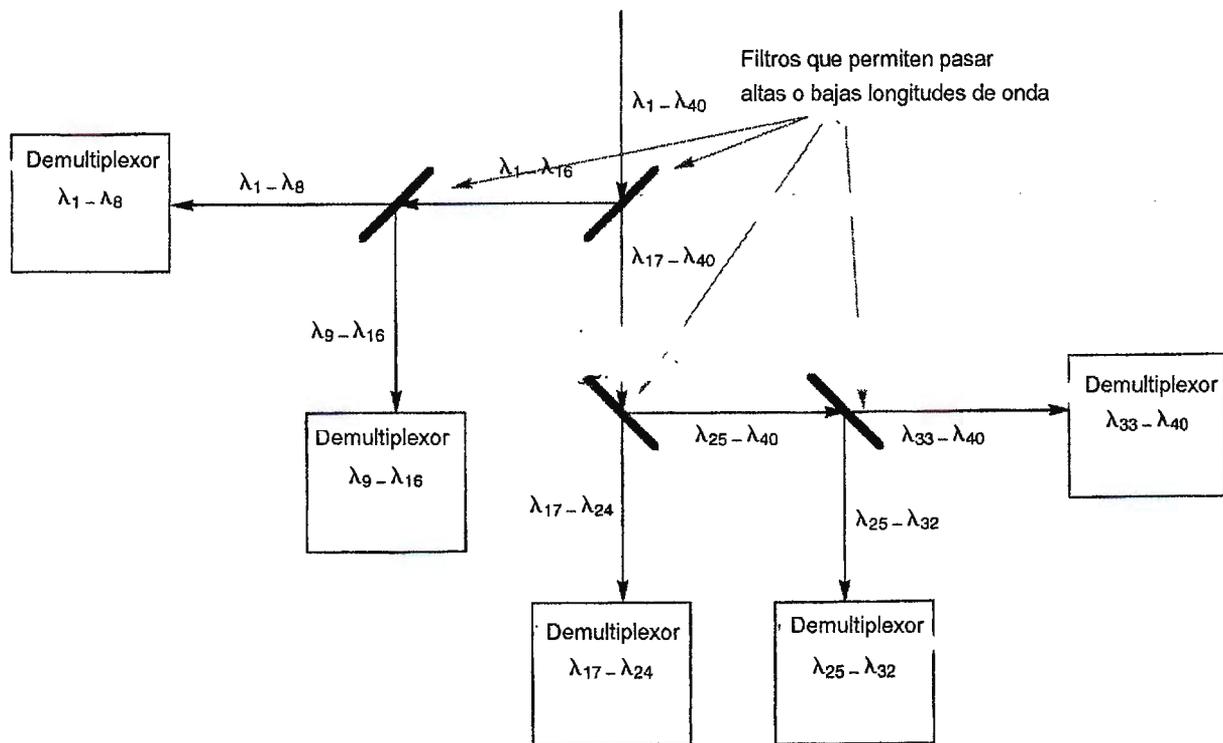


Figura 3.15 Sistema WDM con 40 longitudes de onda ⁽³⁾

De la figura 3.15, la señal que proviene de la entrada pasa por un filtro que permite el paso a altas longitudes de onda y refleja las bajas; para el caso del ejemplo refleja todas las longitudes de onda menores que λ_{17} . Las longitudes de onda reflejadas llegan a otro filtro que permite el paso a longitudes de onda bajas, para esta aplicación se reflejan todas las ondas mayores a λ_9 . Cada uno de los grupos de 8 longitudes de onda son dirigidas a un demultiplexor óptico de 8 canales. Se aplica el mismo efecto para las longitudes de onda que se encuentran entre λ_{17} y λ_{40} . Esta aplicación no reduce el total de filtros por los que tienen que pasar las señales, pero si reduce el efecto al impedir que todas las señales circulen por una cascada de filtros, afectando y atenuando las longitudes de onda restantes.

3.8 Multiplexación óptica por división amplia de longitud de onda

Este sistema es conocido como *CWDM* por sus siglas en ingles *Coarse Wavelength-Division Multiplexing*. Esta tecnología basa su desempeño en la creciente necesidad de optimizar el uso de la fibra óptica, proporcionando una capacidad mucho mayor que los sistemas *WDM* pero por debajo de los sistemas *DWDM*. La diferencia entre estos tres sistemas se encuentra en el tamaño en longitud de onda de cada uno de los canales ópticos que utilizan.

Los sistemas *CWDM* utilizan un espaciamiento entre canales ópticos de 20 nm, trabajando con transmisores láser sin enfriamiento con una tolerancia de ± 3 nm. *CWDM* utiliza las siguientes longitudes de onda 1470 nm, 1490nm, 1510 nm, 1530 nm, 1550 nm, 1570 nm, 1590 nm, 1610 nm; representadas en la figura 3.16.

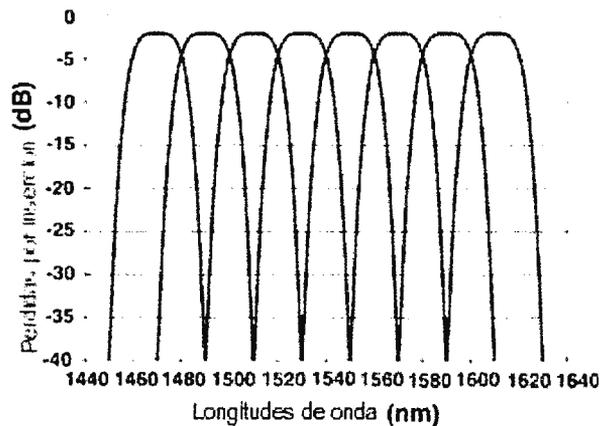


Figura 3.16 Longitudes de onda en sistemas *CWDM* ⁽³⁾

Otra característica que hace diferente este sistema, es el tipo de transmisores que se utilizan para estas aplicaciones; el tipo de transmisores utilizan la tecnología de láser con retroalimentación distribuida o como se conoce en ingles *DFB Distributed Feedback Lasers*. Este tipo de dispositivos no necesitan ser enfriados, a diferencia de los que se aplican a sistemas *DWDM*. Este tipo de transmisores ve afectado su sistema dependiendo la temperatura. Este efecto se contemplaba entre los 0 °C y los 70 °C modificando la longitud de onda en 6 nm.

Para algunas aplicaciones específicas, las longitudes de onda en las que trabaja *CWDM* se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Banda O: 1290, 1310, 1330, 1350 nm
- Banda E: 1380, 1400, 1420 y 1440 nm
- Bandas S, C y L: utilizando 8 longitudes de onda que van desde 1470 nm hasta 1610 nm, con un incremento de 20 nm por canal.

3.9 Multiplexación óptica por división de densidad de longitud de onda

Esta es una técnica más reciente a las otras dos antes mencionadas, teniendo también como finalidad aumentar la capacidad de la fibra óptica. Esta tecnología es conocida en inglés como *Dense Wavelength Division Multiplexing* o *DWDM*.

DWDM es una tecnología que se basa en multiplexación óptica por longitud de onda, pero utilizando un canal óptico más estrecho. Fue diseñado originalmente para ser aplicado a enlaces arriba de los 100 Km o *long haul*.

Debido a que *DWDM* trabaja en los rangos de 1550 nm, esta tecnología puede acoplarse completamente a los amplificadores que utilizan fibras dopadas con erbio.

Las longitudes de onda utilizadas van desde los 1529.77 nm hasta 1560.60 nm o lo que es equivalente, desde 192 THz hasta 196.1 THz. Dependiendo de la aplicación, *DWDM* puede utilizar cualquiera de las siguientes separaciones entre canales: 1.6 nm (200 GHz), 0.8 nm (100 GHz), 0.4 nm (50GHz).

CAPITULO IV

ESTADO ACTUAL DE LA EMPRESA DE TV POR CABLE

4.1 Descripción general

La evaluación del estado actual de la empresa de TV por cable, describe las tecnologías y las principales características de los equipos utilizados para recibir, seleccionar, modificar, combinar y distribuir señales en un ambiente de planta interna y planta externa.

En la actualidad son muchas las empresas de cable que operan en nuestro país, pero para efectos de este trabajo de graduación, el estudio se ha basado en la evolución de la empresa Amnet Telecomunicaciones Limitada. Por efectos de derechos y privacidad en la información de la empresa, se especificarán los detalles más generales que no comprometan el desarrollo o la prestación de nuevos servicios a los clientes, por parte de dicha empresa.

El desarrollo de nuevas tecnologías y su implementación ha sido una necesidad creada para poder satisfacer la creciente demanda de nuevos y mejores servicios a los clientes. Desde la calidad y demanda de canales novedosos de televisión hasta el incremento de servicios con interfases para que los clientes interactúen de una forma fácil y sencilla.

El uso del espectro de frecuencia, los estándares para asignar frecuencias y ser decodificadas por los televisores, son los aspectos técnicamente básicos para poder distribuir la señal. Esta selección técnica está basada en el estándar de televisión denominado *NTSC* que en inglés significa *National Televisión System Committee*, el cual será explicado en este capítulo. A nivel nacional se utiliza el estándar antes mencionado.

Para la asignación de frecuencias a cada uno de los canales de video se utilizan equipos moduladores de audio y video; para luego agrupar cada una de estas.

Una vez agrupadas cada una de estas señales se procede a distribuir esta agrupación de canales y ser transmitidos a distintos lugares geográficos. Para transportar estas señales de un lugar a otro se utilizan transmisores láser, cuyas características se mencionaran en un apartado posterior.

A nivel de red externa, actualmente se utiliza una arquitectura que se conoce como Fibra hasta el nodo, la cual consiste en avanzar en fibra óptica una distancia considerable o según sea la potencia permitida por el transmisor, hasta llegar a un convertidor de señal óptica a radio frecuencia, el cual recibe la combinación de señales de video. En planta externa la estructura de los equipos es tal que debe soportar los efectos provocados por el medio ambiente, por lo que los amplificadores, distribuidores, cables y conectores son de alta resistencia a daños físicos.

El ajuste de niveles con los que las señales son transmitidas, se encuentran sujetas a las limitantes de entrada que presentan los transmisores, de tal forma que las características de las señales no se vean afectadas de forma negativa debido a efectos de saturación, interferencia o atenuación. Esta regla también es aplicada a cada uno de los equipos en planta externa, desde el receptor óptico o nodo hasta cada uno de los elementos utilizados para distribuir la señal y ser entregada a los clientes.

En cuanto a los servicios entregados a los clientes, estos se encuentran basados en la tecnología que se esta utilizando para distribuir la señal, en el caso de la red analizada, lo permitido por una red *HFC* que significa *Hybrid Fiber Coaxial*. Dentro de los servicios brindados se encuentran: video, telefonía y el servicio de Internet de banda ancha.

4.2 Planta Interna

4.2.1 Estándar de video

A nivel americano, la mayoría de países utilizan el estándar *NTSC* en la distribución de señales de video.

La empresa tomada como caso de estudio, también utiliza el estándar de video *NTSC* en cada uno de los equipos de video.

En el caso de los equipos receptores de video, cada una de las señales que son compradas, siempre decodifican señales de video cuyo estándar sea *NTSC*. La figura 4.1 muestra las conexiones realizadas entre los equipos receptores satelitales y un equipo modulador.

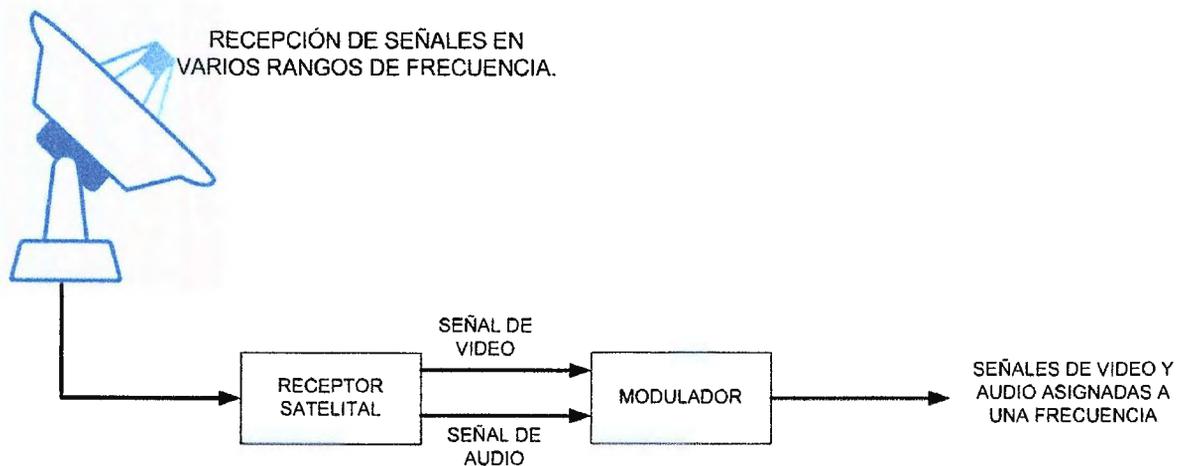


Figura 4.1 Conexión entre una antena, un receptor satelital y un modulador de audio y video

Las características y composición de una señal *NTSC* se presentan en la figura 4.2, donde se representa la asignación de frecuencias de cada señal.

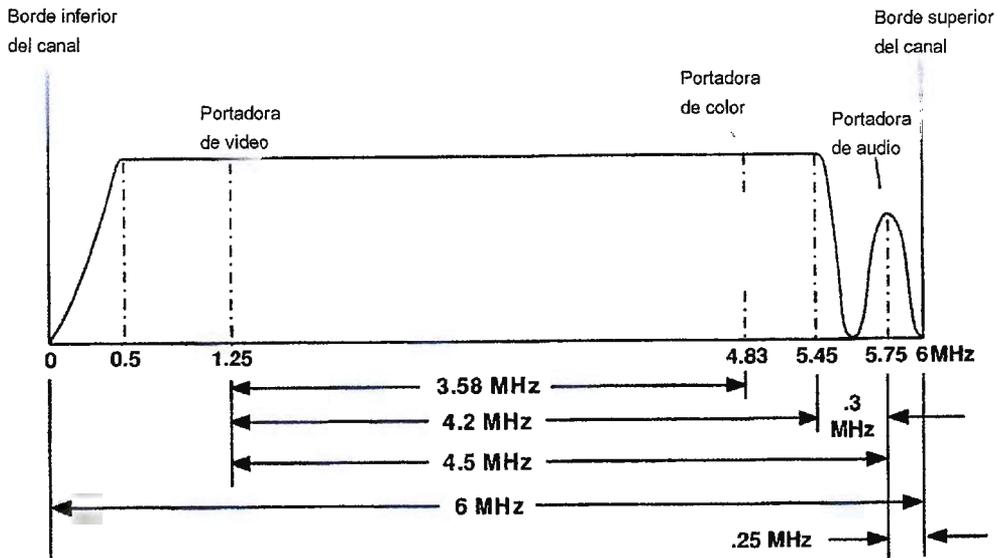


Figura 4.2 Formato de un canal que utiliza el estándar *NTSC*

El estándar de video es el que especifica características como el ancho de banda a utilizar, la posición en frecuencia de las señales, la cantidad de líneas presentadas en un televisor y con que frecuencia. La tabla 4.1 muestra cada uno de estos parámetros.

Característica	Valor
Ancho del canal (MHz)	6
Posición de portadora de video (MHz)	1.25
Posición de portadora de color (MHz)	4.829545
Posición de portadora de audio (MHz)	5.75
Ancho de banda de la portadora de video (MHz)	4.2
Lineas/Frecuencia(Hz)	525/60
Frecuencia de barrido horizontal (kHz)	15.734
Frecuencia de barrido vertical (Hz)	60

Tabla 4.1 Descripción de una señal bajo el estándar *NTSC*

En general, un equipo receptor satelital alimenta con señal de audio y video un equipo modulador, el cual asignará una frecuencia a dichas señales; a lo que conocemos como un canal de televisión, por lo que cada equipo está diseñado para mover en frecuencia las señales según sea su asignación dentro del espectro permitido por los equipos.

4.2.2 Señales satelitales

La programación de la compañía de cable se encuentra basada en la demanda y amplia cobertura de clientes que posee. La selección de las señales a distribuir se selecciona en base a un estudio de mercado que permite elegir los canales con mayor demanda.

Los aspectos legales en relación a la distribución de señal, no se tratarán en este documento; basta mencionar que todas las señales son pagadas de acuerdo a la cantidad de suscriptores que posee la compañía y que la señal a distribuir será regida por la programación originada por la compañía a la cual es comprada la programación.

Como referencia, cada compañía, por ejemplo HBO, poseen distribuidores a nivel mundial que distribuyen y legalizan el uso de la señal de dicha cadena. En el caso de El Salvador, su programación es seleccionada y decodificada dependiendo del receptor satelital y la configuración que posea de acuerdo al pago por uso de señal.

Los satélites utilizados por las compañías de televisión son lanzados dentro de una orbita geoestacionaria, aproximadamente 37,007 Km sobre el ecuador. Los satélites viajan a una velocidad similar al giro de la tierra, manteniéndose constantemente en la misma posición respecto al planeta tierra, permitiendo la comunicación constante y directa con estaciones ubicadas en la superficie terrestre. La mayoría de satélites de comunicación utilizadas por las empresas de televisión poseen 24 *transponders* o canales. Cada uno de estos *transponders* pueden recibir señales desde los

programadores de televisión como HBO, CNN, ESPN, etc para luego ser retransmitidas hacia la tierra.

Las señales retransmitidas hacia la tierra son recibidas por antena de una estación terrena, conocida en ingles como *televisión receive only (TVRO) sites* o receptores únicamente para televisión, a este proceso se le conoce como *downlink*. La antena receptora contiene un plato reflector, cuyas dimensiones pueden variar de acuerdo a las características de la señal que será recibida. La señal recibida es reflejada por el plato para alimentar un cono o *feedhorn*. Es en este dispositivo donde puede estar instalado un amplificador de bajo ruido o *low noise amplifier (LNA)*, bloque convertidor de bajo ruido o *low noise block converter (LNB)* o un convertidor de bajo ruido o en sus siglas en ingles como *LNC* o *low noise converter*. Estos equipos son utilizados para amplificar la señal que se recibe de los satélites.

Las señales satelitales son recibidas a frecuencias que se encuentran entre los 3.7 y los 4.2 GHz. Los *LNA* únicamente son utilizados para amplificar señales, los *LNB* se utilizan para convertir las señales recibidas, a frecuencias más bajas que rondan los valores entre 270 a 770 MHz; los *LNC* son utilizados para convertir una sola señal recibida a 70 MHz. La configuración de cada uno de estos dispositivos dependerá del tipo de señal y la cantidad de señales.

En la actualidad son pocas las señales que utilizan un formato análogo, sobresaliendo en la mayoría de casos señales cuya modulación digital es QPSK, logrando multiplexar varias señales y siendo decodificadas por el receptor satelital según sea el pago hecho a la compañía y la configuración del equipo. Es decir, que pudiendo existir muchos canales de video digitales dentro de la señal recibida por la antena, el equipo receptor dependiendo de los pagos, será capaz de decodificar la señal asignada por la compañía de televisión.

4.2.3 Uso del espectro de frecuencia

La Comisión Federal de Comunicaciones o en inglés *FCC*, fue establecida en 1934 como el ente regulador a nivel de Norte América para el manejo de las comunicaciones, incluyendo la asignación individual en frecuencia de los canales de televisión. Inicialmente se crearon dos divisiones principales *very high frequency (VHF)* y *ultra high frequency (UHF)*, los cuales separan espectros de frecuencias. Asociado con el estándar *NTSC* cada canal fue separado por 6 MHz para disminuir la interferencia entre canales.

En el año de 1940, el canal 1 (entre 44 MHz y 50 MHz) fue asignado para el uso de televisión, pero después se reasignó a otros servicios de radio.

El espectro definido como *VHF* fue considerada originalmente entre los canales 2 y 13, y la banda *UHF* consistía en los canales 14 al 22. La banda *UHF* fue incrementada después hasta alcanzar el canal 83.

Para el caso de la banda *VHF*, se le asignaron dos grupos, el grupo uno denominado como banda baja y el segundo grupo denominado banda alta.

Nombre de la banda	Frecuencia (MHz)	Canal
Banda baja	50 – 88	2 – 6
Banda alta	174 – 216	7 - 13

Tabla 4.2 Grupos de frecuencias para *VHF*

Al surgir las compañías de televisión por cable, la *FCC* autorizó el uso de frecuencias entre 120 MHz y 174 MHz; a estas frecuencias se les llamó banda media y se agregaron nueve canales de 6 MHz entre la banda baja y la banda alta

Nombre de la banda	Frecuencia (MHz)	Canales
Banda media	88 – 174	A – I (14 – 22)

Tabla 4.3 Banda media de frecuencias

Desde que los canales del 14 al 22 fueron asignados a las banda *UHF* para las estaciones de transmisión, se les conocieron a los canales bajo las letras A hasta la letra I, estando asignada la letra A al canal 14, la letra B al canal 15 y así sucesivamente.

En los sintonizadores instalados en los televisores y equipos VHS, se incluyeron conmutadores, que permiten cambiar el modo en que son sintonizados los canales. Los dos estados provistos por los conmutadores son el de *Antenna* y *CATV*. En el estado de *antenna* el sintonizador permite el uso de los canales asignados a las bandas *VHF* y *UHF*; mientras la selección de *CATV* sintoniza la banda baja, banda media y la banda alta.

Según fue el crecimiento y demanda de las compañías de cable, la *FCC* permitió el uso de frecuencias entre los 216 MHz y 300 MHz, permitiendo agregar 14 canales de 6 MHz. A esta banda se le conoció como súper banda; ya con esto las compañías podían proveer 35 canales análogos, utilizando las letras desde la J hasta la letra W para esta nueva banda de frecuencias.

El siguiente cambio se dio cuando la *FCC* permitió el uso de las frecuencias entre 300 MHz y 400 MHz, asignando desde el grupo de letras AA hasta QQ, incrementando en 17 canales de 6 MHz. A esta nueva asignación de frecuencias se le denominó *hyper* banda.

Nombre de la banda	Frecuencia (MHz)	Canales
Súper banda	216 – 300	J – W (23 – 36)
Hyper banda	300 – 400	AA – QQ (37 – 53)

Tabla 4.4 Descripción de la súper banda y la *hyper* banda

La compañía que se está utilizando como caso de estudio, posee un sistema que alcanza hasta los 750 MHz, por lo que puede alcanzar una cobertura de hasta 110 canales análogos, utilizando 6 MHz cada uno. Debido a los servicios y capacidad técnica, el espectro de frecuencia no solo es utilizado para proveer servicios de video, sino también van incluidos los servicios de Internet y telefonía. Esto se logra insertando las portadoras de comunicación que permitan la conexión entre el servidor central y el equipo terminal, sean estos cablemodems o quipos de gestión de voz sobre la red coaxial.

4.2.3.1 Plan de canales

La asignación de una frecuencia específica a cada señal de video, es la base fundamental que hace posible la distribución de señal de televisión por cable.

A nivel general, esta asignación de frecuencias, puede o no tener relación de forma incremental o armónica. En el caso de las portadoras de color y audio se encuentran relacionadas directamente a la portadora de video de cada canal.

A nivel internacional se implementan de forma más continua, tres tipos de planes de canales siendo estos los de portadoras estándar o *STD*, portadoras relacionadas de forma incremental o *IRC* y las portadoras relacionadas armónicamente o *HRC*. La mayoría de compañías de transmisión de canales de televisión utilizan portadoras estándar ó *STD*, siendo este mismo estándar el que utiliza la compañía de televisión por cable que se presenta en este trabajo. De tal forma que todos los equipos moduladores para asignar una frecuencia a cada uno de los canales de video utilizan un plan de canales *STD*, designando de esta forma el espaciamiento entre cada una de las portadoras y la ubicación de las señales en el espectro de frecuencia. En la tabla 4.5 se muestran algunos canales de video con cada una de sus frecuencias asignadas y la diferencia existente entre cada uno de los tipos de planes de canales.

Para efectos de comprensión, se designará *Headend* como el lugar donde son recibidas señales satelitales, para luego ser procesadas y de ser necesario modificar su contenido, asignándoles una frecuencia en el espectro permitido por el cable coaxial y la capacidad de los mismo equipos, combinando estas frecuencias para luego ser distribuidas y transmitidas a otros sitios geográficos.

Numero de canales		Tipo de plan de canales					
EIA	Original	STD		HRC		IRC	
		Video (MHz)	Audio (MHz)	Video (MHz)	Audio (MHz)	Video (MHz)	Audio (MHz)
2	2	55.25	59.75	54	58.5	55.25	59.75
3	3	61.25	65.75	60	64.5	61.25	65.75
4	4	67.25	71.75	66	70.5	67.25	71.75
14	A	121.25	125.75	120	124.5	121.25	125.75
15	B	127.25	131.75	126	130.5	127.25	131.75

Tabla 4.5 Diferencias entre los planes de canales.

Basados en estándares internacionales, el espectro en frecuencia que utiliza la empresa de cable, se subdivide en dos grandes partes siendo la transmisión hacia delante o *forward transmission* utilizando desde los 50 MHz en adelante, pero según el estudio efectuado la empresa utiliza desde los 50 MHz hasta los 750 MHz, cubriendo con 80 canales de video análogo y combinando las señales de transmisión hacia los equipos instalados en los hogares de los clientes, que controlan los diferentes servicios. La otra parte en el espectro de frecuencia se denomina retorno y utiliza desde los 5 MHz hasta los 42 MHz. La figura 4.3 demuestra de una forma general el uso del espectro de frecuencia y el intercambio de información utilizando las bandas antes mencionadas.

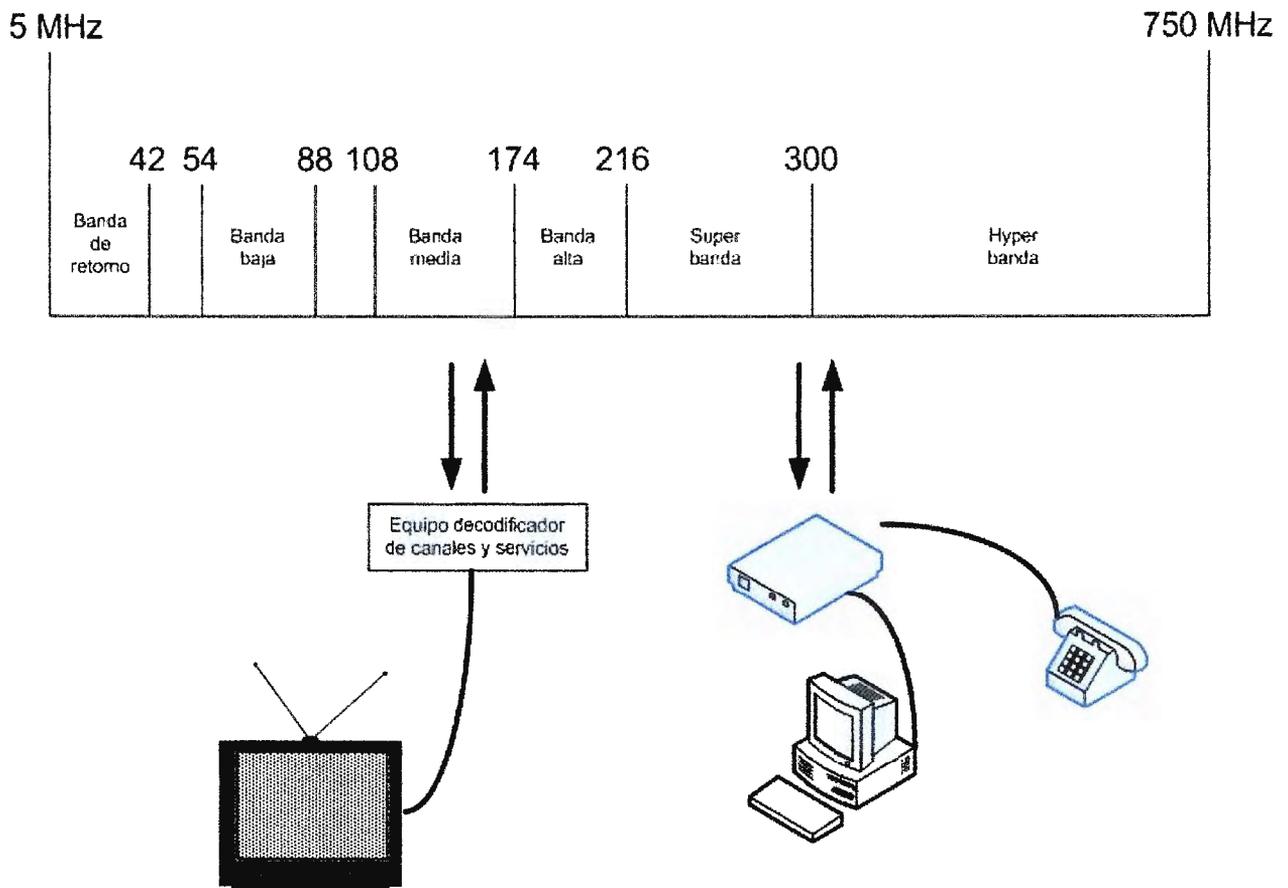


Figura 4.3 Descripción general del uso del espectro de frecuencia.

La asignación de frecuencias para el uso de canales de video varía dependiendo de la demanda que presenten los clientes y el servicio que quiera prestar la empresa de televisión por cable. Así también el contenido de cada uno de los canales puede ser diferente, y esta regido por la compra de señales de video satelitales y la asignación comercial, de preferencia que se les quiera otorgar.

En cuanto a las señales de los canales locales, siendo estos canal 2, canal 4, canal 6, canal 8, canal 10, canal 12, canal 15, canal 17, canal 21, canal 23, canal 25, canal 33, canal 35, canal 67, etc se procesan y se asignan frecuencias de forma diferente a

las señales satelitales, este proceso será explicado en el apartado donde se explica el procesamiento de señales dentro del *headend*.

4.2.4 Procesamiento de señales en *Headend*

En el *headend* son recibidas diferentes tipos de señales procedentes de lugares como estaciones locales de televisión y señales recibidas desde satélites; cada una de estas señales, dependiendo su origen, es procesada de forma diferente.

Dentro de los principales objetivos del procesamiento de señales están:

- Modificar las características de cada una de las señales, para conformar un plan de canales.
- Controlar y de ser necesario modificar el aspecto de las señales para brindar la mejor calidad a los clientes o seleccionar el tipo de señal que será distribuida a los clientes.
- Agregar información a las señales, de tal forma que se puedan transmitir mensajes generados localmente, de forma selectiva en canales de mayor penetración comercial.

La selección de señal satelital es uno de los primeros pasos a seguir en cuanto a estas señales. La selección consiste en alinear una antena parabólica, con las características físicas relacionadas al tipo de señal que se recibirá. Como se vio antes, junto con la antena pueden ser utilizados *LNA*, *LNB* o *LNC*. Una vez seleccionada la señal, convertida a un rango de frecuencia en el que los receptores puedan interpretar la señal, éstos utilizan el estándar *NTSC* para distribuir el audio y video de la señal satelital. Existen diferentes marcas, modelos y tipos de receptores satelitales, utilizando también diferentes algoritmos para decodificar las señales. Como ejemplo se puede mencionar la marca Motorola que utilizan Digicipher II^R en el caso de la recepción de señales satelitales digitales. En la actualidad, la capacidad de los receptores es tal que de ser necesario, a la salida de los dispositivos siempre

se pueden tener señales digitales y multiplexadas, permitiendo de esta forma la distribución de señales digitales de video, siempre y cuando se adicione al sistema un modulador digital y un sistema que permita asignar “viñetas” para el control y decodificación de las señales, pudiendo ser identificadas por cajas decodificadoras instaladas en los clientes.

Este proceso de selección de señales es diferente cuando se trata de una señal de una empresa de televisión local. A nivel nacional el estándar de video utilizado es el *NTSC* y *STD* para la asignación e frecuencias. La selección de estas señales se hace utilizando antenas cuyas características físicas permitan sintonizar la frecuencia del canal local seleccionado. La antena se conecta a un equipo demodulador, el cual permite separar el mensaje de audio y video que traen las portadoras sintonizadas en las frecuencias adecuadas. Una vez separada la información, se obtiene nuevamente la información original de audio y video en formato *NTSC* que la empresa local de televisión generó en sus estudios de transmisión.

Los objetivos a cumplir en la etapa de selección de señal son sintonizar, decodificar y convertir. En señales satelitales y las generadas por las empresas locales de televisión, se cumple el objetivo final de obtener señales *NTSC* de señales de video y audio en el *headend*, para luego continuar el procesamiento.

Según sea el objetivo comercial, al proceso se le pueden agregar algunos pasos, como la inserción de pautas publicitarias, codificación del audio a estereo (si la señal recibida del satélite posee las características), codificación del video para permitir la selección y acceso del contenido a los clientes, lo que permite a la empresa dar nuevos servicios de valor agregado en la parte de video.

La modulación es la parte en la cual a las señales de audio y video en banda base, se les asigna una frecuencia dentro del espectro. Es decir, que una señal en banda base no puede ser distinguida de otra, por lo que es necesario adjudicarles una frecuencia. Los equipos moduladores, deben impedir la interferencia entre las

portadoras de audio y video con los canales adyacentes, además de mantener un nivel de diferencia entre la portadora de audio y video de 10 dB ó 17 dB. Los niveles de cada una de las señales de los canales, son tales que, según la arquitectura utilizada para combinar cada una de las señales moduladas, permita superar las perdidas de cada una de las etapas y alimentar a los dispositivos de transmisión con los niveles requeridos por éstos; por lo que en algunos casos es necesario el uso de amplificadores.

En el caso de las compañías locales de televisión se puede hacer uso de equipos que permiten la demodulación de la señal origen y la asignación de una nueva frecuencia dentro del espectro que utiliza la compañía de televisión por cable. A este equipo se le conoce como procesador, el cual acepta una señal *VHF* o *UHF* originada por lo general desde una antena. A su salida el equipo genera una señal modulada análoga, que puede ser en la misma frecuencia u otra diferente. Los objetivos principales del procesador son:

- Seleccionar la frecuencia deseada, y eliminar las frecuencias adyacentes a ésta.
- Atenuar la portadora de audio y prevenir que interfiera con la portadora de video del canal siguiente.
- Estabilizar el nivel de salida de la señal de video, sin importar las variaciones que se puedan tener a su entrada.
- Amplificar la señal.

Básicamente, en los párrafos anteriores se detalla el procesamiento que requiere una señal, iniciando desde la señal satelital hasta la asignación de una nueva frecuencia. Pero una señal satelital puede necesitar unos pasos adicionales si la señal recibida es codificada. En este caso la señal en banda base remodulada por el receptor satelital debe pasar a través de un decodificador como por ejemplo un *VideoCipher* o

B-MAC. Este decodificador debe estar autorizado por el programador de la cadena televisiva internacional.

Para el caso de señales digitales se puede hacer uso de un receptor y transcodificador integrado o conocido por sus siglas en inglés como *IRT* ó *integrated receiver transcoder*. Los *IRT* reciben señales moduladas digitalmente desde los satélites y cambian el esquema de modulación digital para que la señal pueda ser utilizada en la red de transmisión. La modulación de cambio de fase y cuadratura ó *QPSK* es utilizada en su mayoría por todos los satélites, debido a que este tipo de modulación provee robustez y es poco susceptible a distorsiones y ruido. Uno de los objetivos principales de los *IRT* es convertir señales satelitales recibidas con un tipo de modulación digital *QPSK* a *QAM*, de esta forma permite a la empresa de cable distribuir señales digitales o para el caso comercial televisión digital.

Otro equipo que se utiliza justo después del *IRT*, es denominado *upconverter*. Este dispositivo es necesario debido a que la frecuencia de salida de los *IRT* es de 70 MHz, y el *upconverter* se utiliza para asignar la frecuencia definitiva con la que será distribuida la señal.

Otro paso adicional dentro del procesamiento de una señal en el *headend*, es el uso de *stereo encoders*, de tal forma que si un canal será distribuido con audio estéreo, se utiliza un dispositivo que procesa la señal de audio en banda base y la convierte en una señal estéreo basado en el *Broadcast Television System Comitee* ó *BTSC*. A este estándar de audio también se le conoce como *multichannel television sound* ó *MTS*. El codificador de audio se posiciona eléctricamente entre el receptor satelital ó un demodulador y el modulador.

4.2.4.1 Distribución de señales de video codificadas.

Dentro de las señales de video que distribuye la empresa de televisión por cable, las señales de video se pueden dividir en video libre y video codificado. El caso del video libre no requiere un procesamiento adicional, pero el caso del video codificado es diferente. Es necesario un procedimiento extra para modificar el contenido de la

señal de video y de esta forma controlar la distribución y la capacidad de los clientes de poder interpretar la información.

Existen varios métodos para lograr este objetivo, pero la empresa de cable estudiada utiliza uno en específico. Para efectos didácticos se mencionarán 5 de los métodos más comunes que las empresas de televisión por cable utilizan:

- *Jamming*
- *Trapping*
- Supresión de sincronía
- Inversión de video
- *Interdiction*

El *jamming* consiste en poner una portadora extra sobre la señal del canal de video. Por lo general esta portadora es insertada en el *headend* y se hace aproximadamente a 2.5 MHz por encima de la portadora de video. El propósito de esta nueva portadora es confundir e interferir en el proceso de demodulación que realizan los televisores de los clientes, provocando que la imagen y el audio del canal no se puedan interpretar por las personas, hasta que la portadora extra sea removida.

Para remover esta portadora es necesario instalar en el interior del hogar del cliente, un filtro en línea con la acometida que brinda el servicio de televisión por cable. Este dispositivo es un filtro rechaza banda de muy angosto espectro, cuya frecuencia central es la frecuencia de la portadora utilizada para causar la interferencia. Con este filtro se logra atenuar considerablemente la portadora interferente y debido a su constitución, afecta muy poco a las portadoras aledañas. Este proceso es una buena opción cuando no se cuenta con una gran cantidad de canales codificados. Las limitantes de este método es que al dañarse el filtro este pueda remover demasiada información del canal de video, reduciendo en gran manera la calidad de la señal o por el contrario, no filtre por completo la portadora que causa la interferencia y de igual forma no permita a los clientes observar el canal de televisión. La figura 4.4 muestra la señal que causa la interferencia.

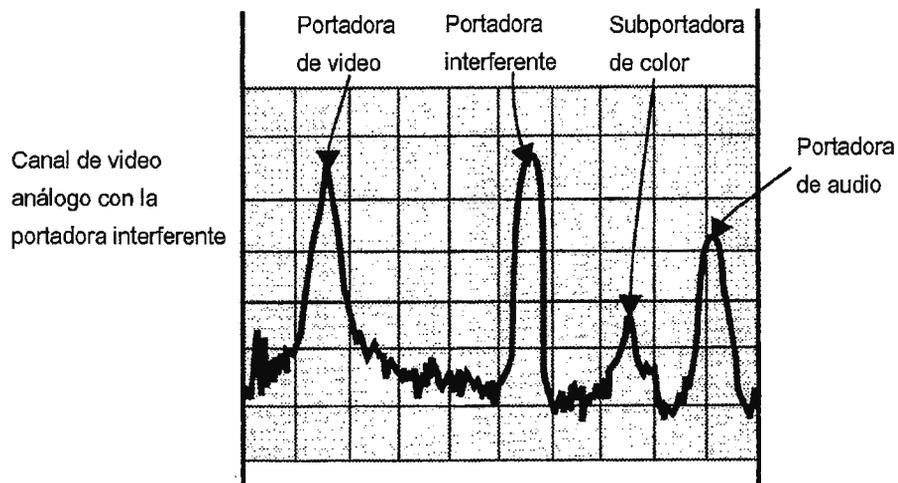


Figura 4.4 Portadora interferente presente en un canal de televisión por cable.

El método llamado *trapping*, consiste en el uso de filtros rechaza banda que eliminan por completo los 6 MHz de un solo canal o de un grupo de canales. Este método es uno de los que utiliza la empresa de televisión por cable estudiada, cuando por efectos comerciales al cliente se le brinda un paquete que cuenta con un número limitado de canales. Las ventajas de este método es que se puede controlar directamente a los clientes, sin necesidad de utilizar equipos adicionales en el *headend*. Las desventajas de este método es que estos dispositivos son expuestos al medio ambiente y su funcionamiento no puede ser el deseado al pasar el tiempo, moviéndose en su frecuencia central eliminando una mayor cantidad de canales o dejando pasar canales que no corresponden al paquete asignado al cliente.

La supresión de la sincronía es otro de los métodos utilizados por la compañía de televisión por cable. El objetivo de este método es remover la información de sincronía de la portadora del canal, sea esta la horizontal o vertical, dando como resultado una señal que si puede ser escuchada pero no ser interpretada visualmente por los clientes. En este método si es necesario el uso de un equipo adicional en el *headend*, por cada uno de los canales que se quiere codificar. A estos dispositivos les llamaremos codificadores, cuyo objetivo es eliminar o atenuar la

información de sincronía. La conexión eléctrica de estos equipos es justo antes de que la señal sea modulada. El codificador además de eliminar la sincronía, agrega información al canal de video para que del lado de los clientes que tengan un decodificador, este último dispositivo puede reinsertar las señales de sincronía y volver visibles e interpretables los canales de video. Los decodificadores son programados de tal forma que según sea el paquete de canales obtenido por los clientes, así sea el número de canales que decodifique. Este método es muy efectivo pero costoso para la empresa de cable, ya que tiene que distribuir los equipos decodificadores por cada televisor que posean los clientes.

La inversión del video se utiliza en combinación con la supresión de la señal de sincronía, eliminando por completo la posibilidad de que los clientes puedan interpretar las señales de video codificadas. El efecto de invertir el video, es similar al que se observa en un negativo de un film fotográfico.

El método de *interdiction* consiste en instalar un equipo adicional en la planta externa, el cual permita el control de las señales que se distribuyen a los clientes. Este es un método demasiado costoso ya que los puntos de distribución de señal deben ser sustituidos por elementos eléctricamente activos que permitan el control y la configuración de las señales a distribuir.

4.2.5 Dispositivos ópticos de planta interna

4.2.5.1 Transmisión de señales utilizando tecnología láser

Después modular y asignar una frecuencia a cada una de las señales, procesarla, codificarla de ser necesario o manipularla de alguna forma en el *Headend*, las señales deben ser combinadas y completar el uso del espectro en frecuencia para luego ser enviado a la red externa, teniendo como destino final los hogares de los clientes. Para lograr la combinación de todos los canales de video, se hace uso de dispositivos combinadores que permitan mezclar varias señales en diferentes

entradas, cuyo nivel de aislamiento entre estos debe ser el necesario para no generar interferencias, y obtener en una salida individual todo el bloque de señales. Por lo general se utilizan dispositivos pasivos que presenten niveles de aislamiento considerables para que no exista interferencia entre las señales mezcladas. Existen también modelos activos de estos combinadores, los cuales permiten el manejo y combinación selectiva de señales manejando diferentes niveles de entrada y salida, pero teniendo como desventaja el número de amplificadores necesarios en su interior para controlar y distribuir señales sin pérdidas de nivel, pero aportando alguna cantidad de ruido eléctrico a la señal ocasionada por sus elementos activos.

La salida de estos combinadores es dirigida hacia los equipos de distribución que alimentarán cada uno de los transmisores láser.

En la actualidad existen muchas compañías de televisión por cable en nuestro país, pero como se propuso en este trabajo de graduación, se tomará como caso de estudio el uso de dispositivos láser para distribuir la señal hacia la red externa. Aunque la mayoría de casos a nivel nacional, las compañías eligen por distribuir su señal desde el *headend* utilizando el cable coaxial, limitando en muchos casos la cobertura de señal, permitiendo la existencia de interferencias y fallas; actualmente un factor muy importante es el delito por robo de cables de cobre en planta externa, en la que tanto las compañías de televisión por cable, las compañías de telefonía y telecomunicaciones en general se ven afectadas.

Las ventajas del uso de fibra óptica para distribuir las señales originadas en el *headend* son las siguientes:

- Reduce el número de amplificadores en cascada para lograr mayor cobertura.
- La fibra óptica mantiene un alto nivel de calidad en la señal entre el *headend* y el nodo receptor en la planta externa.
- La fibra óptica es totalmente inmune a las interferencias eléctricas.
- La fibra óptica no es generadora de interferencias.

- Permite un alto nivel de flexibilidad y creatividad a los diseñadores de la red.
- Permite seguridad en el transporte de señales ya que éstas deben ser convertidas a *RF* o radio frecuencia para poder ser interpretadas por los receptores de los clientes.

Los transmisores más utilizados en la industria de la televisión por cable, usan las longitudes de onda de 1310 nm y 1550 nm. Como se vió en capítulos anteriores estas longitudes de onda presentan una atenuación de 0.35 dB/Km y 0.25 dB/Km respectivamente, comparado con cerca de 1 dB/pie que presenta un cable coaxial a 400 MHz.

Estos transmisores son alimentados con las señales combinadas en el *headend*, utilizando semiconductores diseñados específicamente para la transmisión de señales análogas. La señal en radio frecuencia modulan al láser el cual convierte la señales eléctricas a lumínicas. En el estudio realizado a la empresa de televisión por cable, los transmisores utilizan una tecnología denominada *distributed feedback láser* permitiendo potencias de salida entre los 2 dB hasta los 16 dB. Otra característica importante de los transmisores es que permiten ser alimentados con canales análogos y digitales, por lo general alojadas entre los 47 MHz y los 870 MHz.

La cantidad de canales a su entrada no modifica el nivel de potencia de luz que estos dispositivos transmiten pero si existe una relación entre el nivel de señal requerido a la entrada del dispositivo y la cantidad de canales presentes en el espectro de frecuencia. La siguiente formula 4.1 determina el valor que necesitan los transmisores a su entrada.

$$\text{Nivel de entrada} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{canales}}{\text{capacidad total de canales}} \right) \quad \text{Formula 4.1}$$

Comercialmente existen muchas empresas dedicadas a la construcción de estos equipos, por lo que el desempeño puede ser diferente, pero el objetivo es el mismo el cual es convertir una señal eléctrica la cual contiene la información de los canales de video y audio, a una señal óptica.

El uso de transmisores en planta interna puede clasificarse en dos ramas: para uso de señales de *forward* y para transmitir señales de retorno. En ambos casos la tecnología láser utilizada es la misma cambiando únicamente el rango de frecuencias de trabajo. De forma general, los transmisores utilizados en planta interna poseen las siguientes características:

- Utilizan tecnología láser *DFB*.
- Puntos de medición.
- Para el caso de estudio una interfase con una impedancia de 75 ohms.
- Controles de ganancia para las señales de *RF*.
- Una respuesta de planicidad de la señal de aproximadamente ± 0.75 dB.
- Una pendiente entre las bandas de frecuencia de ± 0.5 dB.
- Un nivel de temperatura adecuado en el que desempeño del equipo sea óptimo.
- Valor típico de relación de señal con el ruido ó *C/N* de 60.5 dB.
- Valor típico de componente de segundo orden o *CSO* de 60 dB.
- Valor típico de pulso triple compuesto o *CTB* de 65 dB.
- Es necesario un ajuste en el nivel del índice de modulación óptico ó *OMI*.

Las características son diferentes en cada modelo y marca de transmisor, por lo que solo se pueden mencionar las características generales.

Como ejemplo se muestra en la figura 4.5 un diagrama general de un transmisor marca Philips.

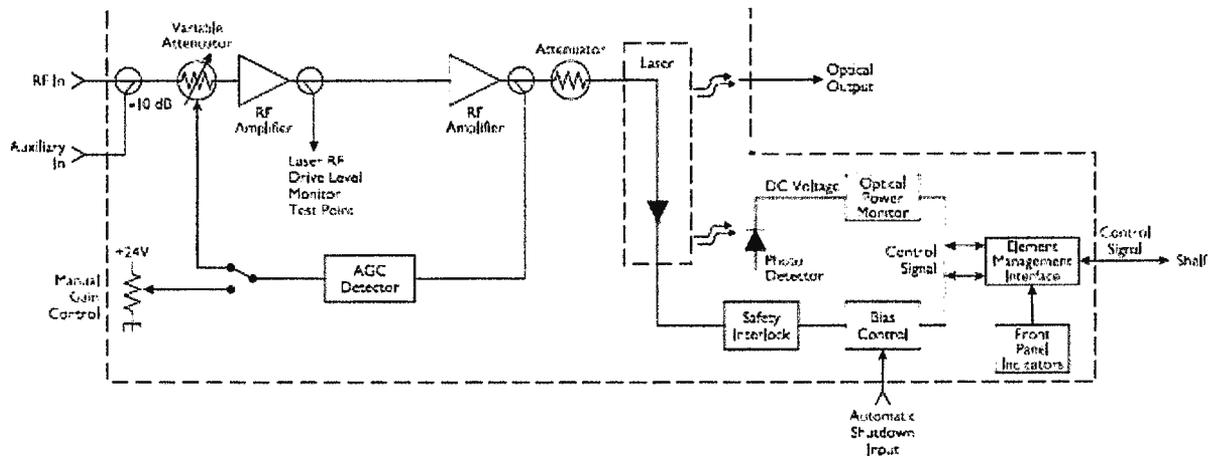


Figura 4.5 Diagrama general de un transmisor

En general, un transmisor consta de etapas de detección, control y conversión de señales.

Uno de los transmisores utilizados son los de la marca *ADC* que posee las siguientes características:

- Uso de espacio de una sola unidad de *rack*.
- Láser activado por un seguro con llave para evitar accidentes por exposición de láser, permitiendo activar el tráfico hasta que se realicen todos los procedimientos de chequeo.
- Punto de medición de la señal a convertir.
- Pantalla que despliega información el estado del equipo.
- Contactos secos para notificación de alarmas generales.
- Fuente de poder interna.
- Valores de *CSO* de -66dBc.
- Valores nominales de *C/N* de 53.2 dB.
- Valores nominales de *CTB* de -70 dBc.

En la figura 4.6 se muestra la respuesta en frecuencia de un transmisor, medida y presentada por el fabricante, para un modelo que posee un ancho de banda de trabajo desde los 47 MHz hasta los 1000 MHz.

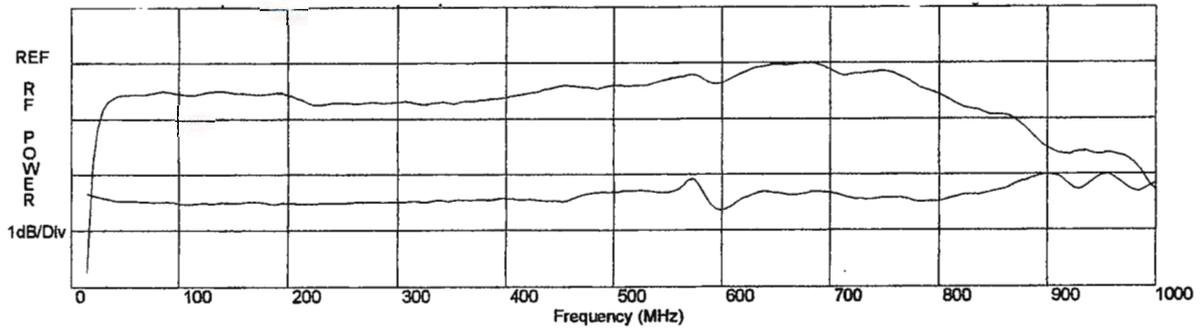


Figura 4.6 Respuesta en frecuencia de un transmisor.

4.2.5.2 Recepción de señales láser

Los dispositivos receptores ópticos instalados en planta interna también entran en la clasificación según sea la banda de frecuencia utilizada. De tal forma que para un enlace entre el *headend* y otro sitio donde se transmitan señales de video será necesario el uso de un receptor de *forward* para convertir las señales ópticas. En el caso de las señales que son enviadas desde el nodo hacia el *headend* será necesario utilizar un receptor de retorno. En ambos casos se utilizan dispositivos foto híbridos para recibir las señales ópticas y convertirlas a *RF*.

A nivel general, la mayoría de detectores de señales ópticas generan un flujo de electrones proporcional a la señal de luz a la entrada del dispositivo receptor. Esta señal necesita ser amplificada y convertida en voltaje, proceso que requiere por lo general de dos etapas, una es de preamplificación y otra de amplificación, donde cada una actúa según sea el nivel de la señal.

Un fotodiodo puede ser considerado como un receptor óptico, pero un receptor utilizado en la industria de televisión por cable es mucho más que eso.

La mayoría de detectores utilizados en la industria son fotodiodos o fotodetectores. Las características operativas de un detector están determinadas por su composición y su estructura.

Dentro de la composición se pueden utilizar diferentes tipos de elementos como lo son el germanio, el silicio, combinaciones de galio y arsénico, combinaciones de indio galio arsénico y combinaciones de cualquier otro material semiconductor. La tabla 4.1 muestra la relación entre los materiales que componen a un detector y las longitudes para los que son utilizados.

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	400 – 1100
Germanio	600 – 1600
Galio arsénico	400 – 900
Indio galio arsénico	900 – 1700
Indio galio arsénico fósforo	800 – 1600

Tabla 4.6 Relación entre los materiales y las longitudes de onda que pueden detectar.

La figura 4.7 muestra las curvas de respuesta a las longitudes de onda de cada uno de los materiales y combinaciones antes mencionadas.

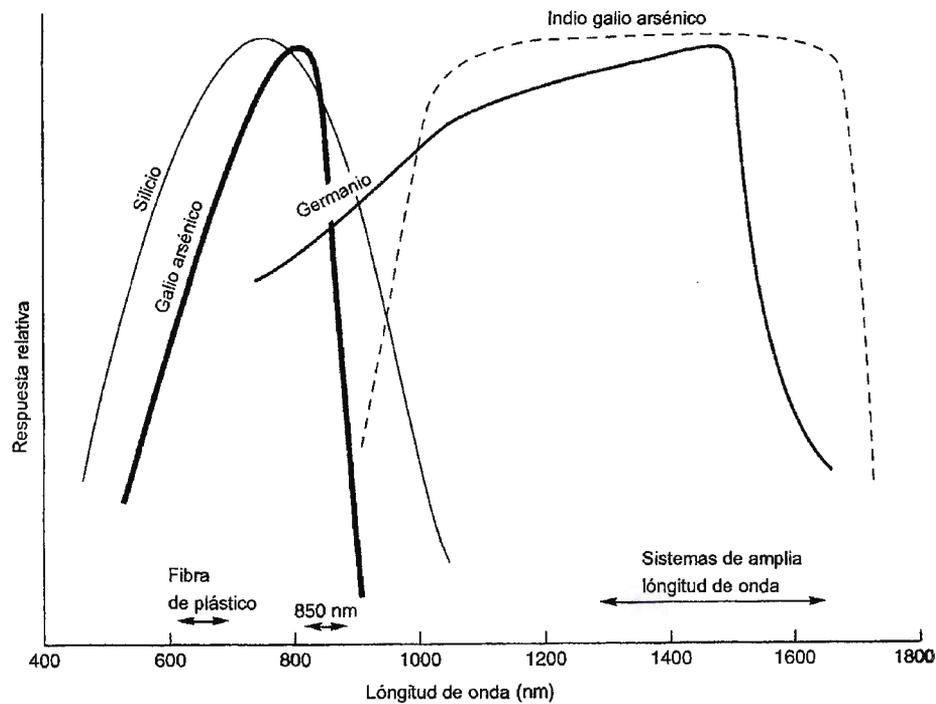


Figura 4.7 Relación entre los materiales y las longitudes de onda

La combinación de los siguientes elementos juntos con una estructura pueden dar origen a los siguientes dispositivos:

- Fotodiodos con regiones pn y regiones pin.
- Fototransistores.
- Fotodiodos con efecto de avalancha.

Cada uno de estos dispositivos posee diferentes características que los hacen aplicables en diferentes situaciones, dentro de los principales parámetros que se toman en cuenta son los siguientes:

- Respuesta entre la corriente generada, en amperios, por el dispositivo en relación al nivel de luz en watts recibidos.
- Tiempo de respuesta.
- Corriente en la ausencia de luz.
- Sensibilidad.
- Puntos de medición.

Al igual que los transmisores, los dispositivos receptores poseen diferentes características según sea su marca y modelo.

Uno de los equipos utilizados es en la marca *ADC* en el modelo *Homeworx Receiver*, que posee las siguientes características:

- Punto de medición.
- Pantalla que presenta información de estado y niveles.
- Ventana de recepción óptica de -9 dBm hasta +3 dBm.
- Control de nivel de señal, el cual permite atenuar la señal convertida de luz a *RF*.

La tabla 4.7 muestra un aproximado del nivel de salida en *RF* según el nivel de potencia óptica a la entrada del receptor.

Nivel óptico a la entrada para una señal a 1310 nm (dBm)	Nivel de <i>RF</i> a la salida en un rango de hasta 870 MHz (dBmV)
-9	-1.8 – 8.2
-8	0.2 – 10.2
-7	2.2 – 12.2
-6	4.2 – 14.2
-5	6.2 – 16.2
-4	8.2 -18.2
-3	10.2 – 20.2
-2	12.2 – 22.2
-1	14.2 – 24.2
0	16.2 – 26.2
+1	18.2 – 28.2
+2	20.2 – 30.2
+3	22.2 – 32.2

Tabla 4.7 Niveles de salida de un receptor óptico marca *ADC* y modelo *Homeworx*.

4.2.5.3 Multiplexación óptica

Como se explicó en un capítulo anterior existen muchos métodos de poder multiplexar señales en un solo hilo de fibra óptica.

La optimización del uso de la fibra óptica es la que obliga al uso de estos dispositivos.

Según el estudio realizado del estado actual de la empresa de cable respecto al uso de dispositivos ópticos, se encontró que la tecnología utilizada es la multiplexación por densidad de longitud de onda o *DWDM*. De tal forma que le permite multiplexar varias señales ópticas en un solo hilo de fibra.

Principalmente el uso de estos dispositivos se da para transportar señales de retorno de un sitio a otro, esto con el objetivo de proveer conectividad entre los lugares donde se prestan servicios de doble vía o en la banda de *forward* y retorno.

Los canales, según la Unión Internacional de telecomunicaciones, más utilizados son los siguientes:

Canal óptico según la ITU	Longitud de onda (nm)	Color
21	1560.61	ROJO
23	1558.98	
25	1557.36	
27	1555.75	
29	1554.13	
31	1552.52	
33	1550.92	
35	1549.32	

37	1547.72	NO UTILIZA FILTROS ROJO O AZUL
39	1546.12	
41	1544.53	
43	1542.94	
45	1541.35	AZUL
47	1539.77	
49	1538.19	
51	1536.61	
53	1535.04	
55	1533.47	
57	1531.90	
59	1530.33	

Tabla 4.8 Canales ópticos según la *ITU*

4.2.5.4 Amplificadores ópticos

El uso de amplificadores ópticos se vuelve necesario al cubrir extensas áreas geográficas.

La empresa que se ha tomado como caso de estudio utiliza primordialmente amplificadores con fibras dopadas de erbio o *EDFA*, en diferentes potencias, lo que permite la cobertura casi a nivel nacional.

Las especificaciones de estos dispositivos se realizó en un capítulo anterior.

4.2.5.5 Divisores y acopladores ópticos

Los divisores y acopladores ópticos utilizados, son dispositivos pasivos que permiten distribuir, según sea el modelo del dispositivo, la señal óptica a su entrada. La figura 4.8 muestra el diagrama general de cada uno de estos dispositivos.



Figura 4.8 Diagrama general de un divisor y acoplador óptico.

Las configuraciones internas de cada uno de estos dispositivos distribuyendo la señal en porcentajes en cada una de sus salidas. Idealmente los dispositivos no consumen ningún tipo de señal, pero en la realidad los dispositivos presentan atenuación por cada acople entre los conectores de entrada y salida, atenuaciones por cada constitución física de cada divisor.

La figura 4.9 muestra la configuración de los dispositivos.

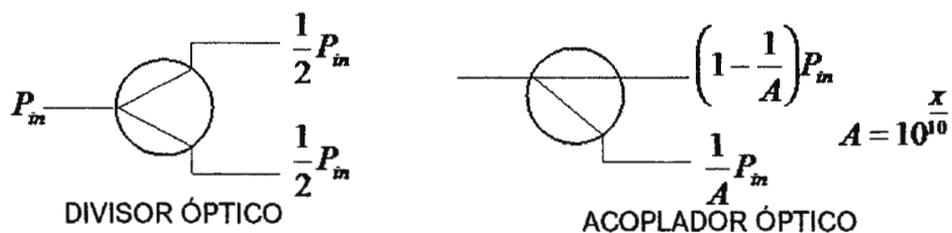


Figura 4.9. Configuración de dispositivos.

Estos dispositivos son utilizados para distribuir señal a más de un nodo al mismo tiempo, utilizando un mismo transmisor. El porcentaje de señal otorgado al nodo dependerá de cuan distante se encuentre y según sean los parámetros de recepción necesarios de la señal óptica en el nodo.

4.3 Distribución de señal en planta externa.

El sistema de distribución de señal en planta externa inicia en el nodo, el cual es el dispositivo que recibe la señal proveniente del transmisor instalado en el *headend* o en un sitio de regeneración de señal. El nodo convierte la señal óptica en una señal eléctrica en radio frecuencia, la cual representa el mismo bloque de señales y canales originados en el *headend* con algunas modificaciones en los niveles debido al procesamiento dado por el láser del transmisor y receptor.

El sistema de distribución posee varios elementos, estos son:

- Cable coaxial y conectores.
- Dispositivos activos (amplificadores)
- Dispositivos pasivos (divisores, divisores direccionales, *taps*, etc)

Podría pensarse que solo señales de video y portadoras digitales son las que viajan a través de la red, pero debido a los dispositivos activos utilizados, se necesita transportar voltaje para alimentarlos. Se volvería muy costoso utilizar un sistema de distribución de energía eléctrica privado de la empresa para proveer de energía a los amplificadores y demás dispositivos que lo requieran, por lo que se hace uso de filtros que permitan combinar señales de corriente alterna con las de video sin que esto afecte la calidad de las señales. Esto es posible primordialmente por la gran separación en frecuencia existente entre las señales y por un dispositivo que permite acoplar las señales para que viajen en un mismo cable y que a la vez permita separarlas en el momento que sea necesario.

Las señales en la banda de retorno son las que se generan en los equipos instalados en los hogares de los clientes y viajan por toda la red hasta llegar al nodo, donde éste posee un dispositivo transmisor láser que necesitará una fibra óptica.

El dispositivo de retorno se encarga de recibir todas las señales en la banda de frecuencia asignadas al retorno y convertirlas a luz para transmitir las hacia el *headend* o algún otro sitio donde se procese la señal. Toda la red externa debe estar

capacitada para poder manejar señales en doble vía para poder prestar servicios de telefonía, datos, películas pague por ver, etc y cada uno de los equipos en planta externa deberán ser ajustados en la banda de *forward* y retorno de tal forma que las señales viajan a través de la red de una forma íntegra para permitir alta calidad de los servicios prestados a los clientes.

La figura 4.10 ilustra en forma general el flujo de la señales de retorno.

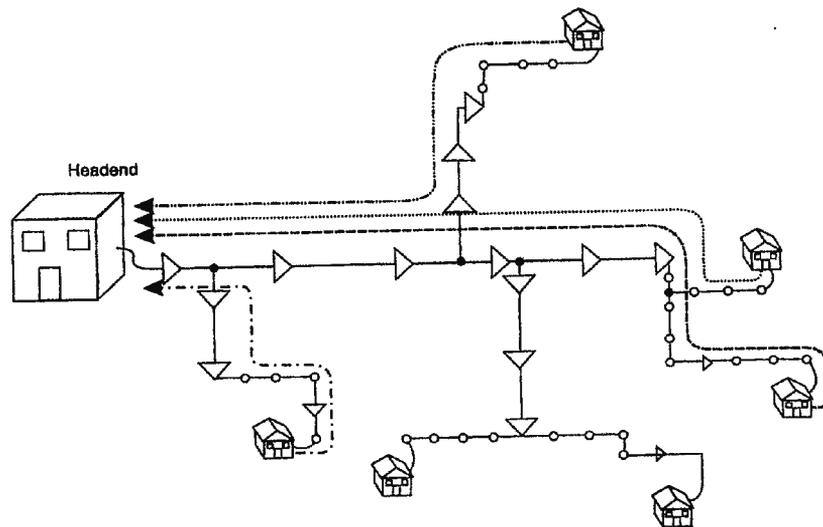


Figura 4.10 Flujo de señal de la banda de retorno.

Al pensar en un dispositivo que transmite desde el nodo hacia el *headend*, es necesario el uso de un receptor de señales de retorno instalado en planta interna.

Es en el flujo de las señales de retorno donde la aparición de interferencias y ruidos eléctricos se da con excesiva frecuencia. Esto debido a que todas las señales originadas por los clientes, los ruidos generados por los dispositivos de planta externa y las interferencias que pueden recibir los dispositivos pasivos y activos de la red se combinan y son enviados hacia planta interna. A la combinación de todas estas señales se le conoce como efecto Funnel.

4.3.1 Arquitectura de la planta externa

Debido al crecimiento y mejoras en las tecnologías de distribución de señales, son muchos los tipos de arquitecturas en planta externa que utilizan las diferentes empresas de televisión por cable, las cuales se pueden clasificar en grupos que utilizan la fibra óptica dentro de su distribución y las que utilizan otros medios.

Podemos mencionar en el grupo de arquitecturas que no utilizan fibra óptica:

- Arquitectura de árboles y ramas.
- Arquitectura de árboles y ramas con alimentación de microondas.

La arquitectura de árboles y ramas, es el tipo de diseño original de una red de distribución que consiste en el uso de cable coaxial y amplificadores para transportar la señal desde el *headend* hasta los clientes. Los componentes básicos de esta arquitectura es el transporte dado por los amplificadores troncales, la distribución lo cual se compara con las ramas de un árbol y las acometidas que se comparan como las hojas. La figura 4.11 muestra el diseño básico implementado en esta arquitectura de red externa.

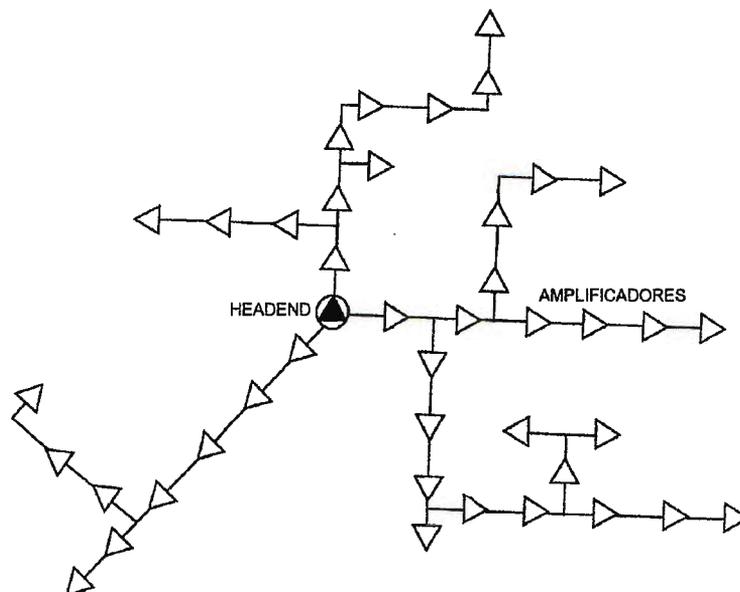


Figura 4.11 Arquitectura de árboles y ramas

Esta arquitectura se vuelve demasiado susceptible a fallas en la red debido que distribución es 100% en cable coaxial, por lo que sus limitantes son:

- Cobertura de servicio.
- Calida de imagen debido a la aportación de ruido de cada amplificador.
- A nivel nacional se ven demasiado castigadas por el robo de cables para su posterior extracción del cobre.
- Mantenimiento de red externa más minucioso.

El segundo tipo de arquitectura mencionado es el que combina la arquitectura de árboles y ramas con señales de microonda. En este tipo de arquitectura, buena parte de los amplificadores troncales se ven sustituidos por el enlace por aire que provee la microonda, por lo que la señal originada en el *headend* se transmite por aire y se recibe en una parte de la red externa para continuar con el uso de cable coaxial al igual que la arquitectura de árboles y ramas. La figura 4.12 muestra detalles de esta red.

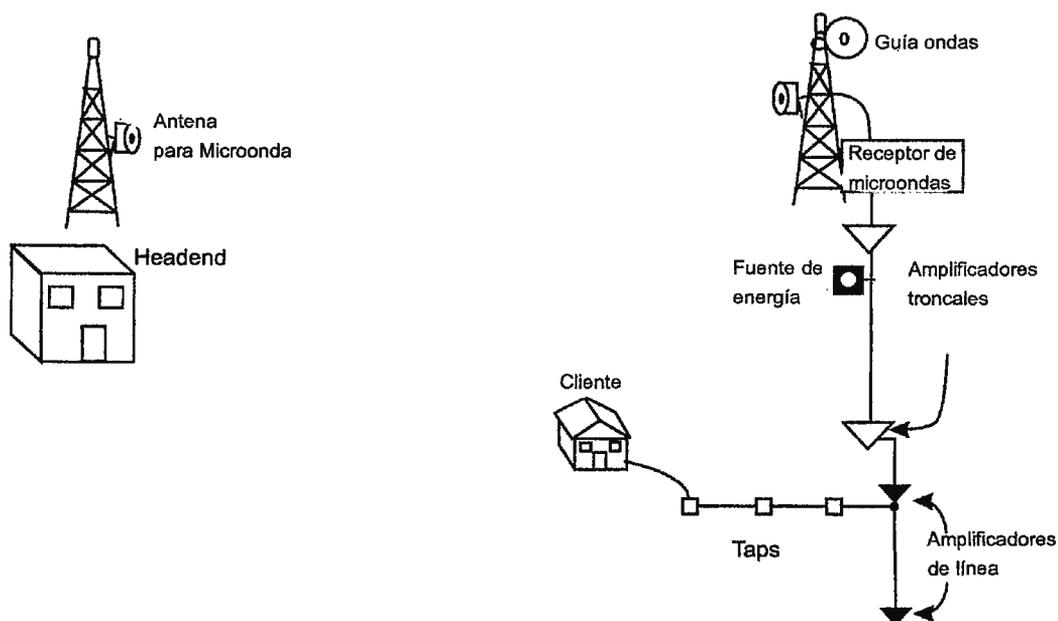


Figura 4.12 Arquitectura de árboles y rama con alimentación de una señal de microonda

Esta arquitectura provee la ventaja de disminuir el uso de amplificadores troncales para lograr mayor cobertura. A nivel nacional no se tiene conocimiento de alguna empresa que distribuya televisión por cable de esta forma. Una de las limitantes mayores en esta arquitectura es el uso del espectro radio eléctrico aéreo y la inversión económica que se necesita para el montaje del enlace microonda.

Entre las arquitecturas de red externa que utilizan fibra óptica en su distribución podemos mencionar:

- Fibra hasta los amplificadores troncales o *FTB (Fiber to the Feeder)*
- Fibra hasta el ultimo dispositivo activo o *FTLA (Fiber to the Last Active)*
- Fibra hasta la esquina ó *FTC (Fiber to the Curb)*

La arquitectura *FTB* consiste en utilizar transmisores láser en el *headend* y en la planta externa utilizar divisores ópticos para alimentar diferentes nodos, los cuales se encargan de convertir la señal óptica a radio frecuencia. Cada nodo alimenta cierta cantidad de cliente, por lo que el uso de amplificadores después del nodo dependerá de la cantidad de suscriptores que por lo general son de 200 hasta 2000 clientes por nodo. La figura 4.13 muestra esta arquitectura de red externa.

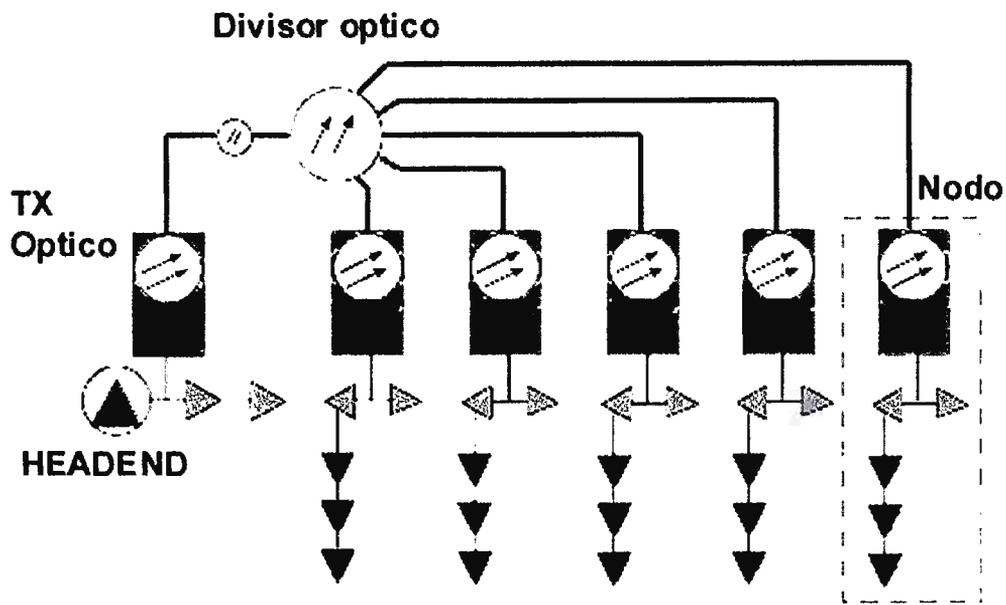


Figura 4.13 Arquitectura FTF

Fibra hasta el último activo o fibra hasta el nodo, es el tipo de arquitectura que utiliza la empresa que se está estudiando. Este diseño de red elimina por completo los amplificadores en cascada para poder cubrir mayores distancias ya que es la fibra óptica la que permite posicionar el nodo en una zona estratégica y por las propiedades físicas que ya se discutieron anteriormente, se pueden avanzar distancias considerables antes de convertir la señal de óptica a eléctrica. Existen variantes en la implementación de esta arquitectura, ya que en algunos casos la red puede ser totalmente pasiva después del nodo, no siendo de esta forma en el caso de estudio. Después del nodo existe una serie de amplificadores que permiten distribuir la señal dependiendo del tamaño o cobertura geográfica que se le quiera dar al nodo. Con este tipo de arquitectura se pueden cubrir entre 500 y 1000 clientes. Como se explicó antes, el espectro de frecuencia se divide en dos ramas, por lo que la red externa también se encuentra capacitada para tratar estos dos bloques de frecuencia. Las señales de *forward* y de retorno viajan por toda la red. La señal de *forward* que se transmite desde el *headend*, llega al nodo el cual se encarga de convertir la señal óptica a *RF*, para luego pasar a los dispositivos amplificadores y dispositivos pasivos hasta llegar al cliente. La señal de retorno que se origina en el

cliente, llega hasta el primer dispositivo activo más cercano, el cual cuenta con un modulo de retorno para amplificar éstas señales, para luego ser transmitida hacia el nodo. Este ultimo dispositivo cuenta con un transmisor que se encargará de convertir la señal de radio frecuencia generada por el cliente a una señal óptica que será enviada hasta el *headend* o un sitio donde se tratará esta señal que permitirá cerrar el anillo de comunicación entre los equipos instalados en los sitios de la empresa de televisión por cable y los equipos instalados en los hogares de los clientes.

Toda la gestión y asignación de niveles de la red es tal que permite a los equipos trabajar dentro de su ventana normal de eficiencia, de tal forma que define la calidad de servicios dados a los suscriptores.

La figura 4.14 muestra un diagrama básico y general del uso de la fibra hasta el nodo.

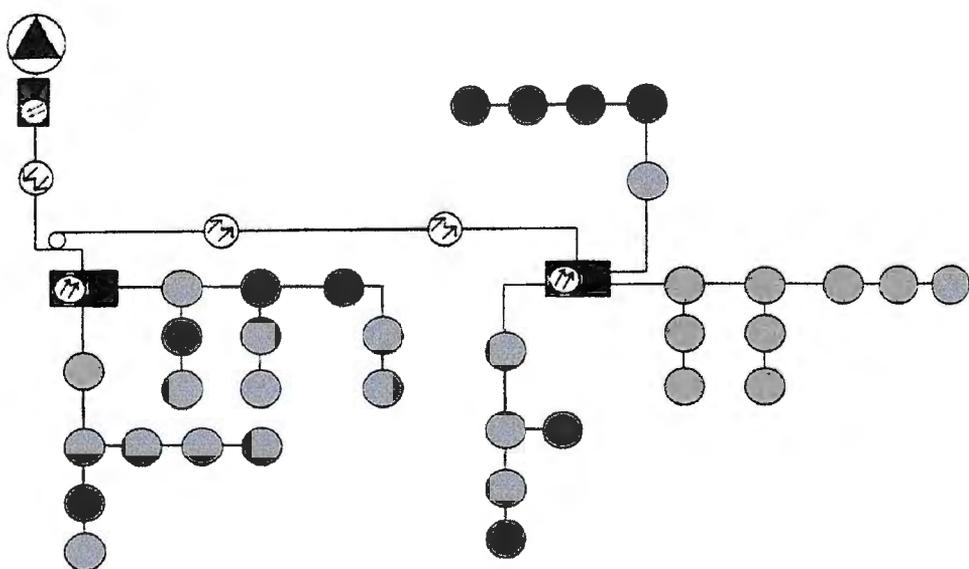


Figura 4.14 Arquitectura *FTLA* o fibra hasta el nodo.

Dentro de las limitantes, las cuales forman parte de la justificación de la creación de la propuesta para la implementación de otro tipo de arquitectura, tenemos:

- El deterioro que sufre el cable coaxial y sus dispositivos, debido a las inclemencias del tiempo se convierten en fallas difíciles de detectar a lo largo de la red coaxial, transformándose en una inversión de tiempo y dinero para superar los problemas.
- Las limitantes técnicas antes explicadas que posee el cable coaxial.
- El uso del espectro de frecuencias dentro del cable coaxial tiene una limitante en el mismo cable y en los dispositivos activos y pasivos utilizados en la red externa y planta interna. Este se convierte en la necesidad de balancear el uso de frecuencias para brindar el servicio de televisión y servicios de telefonía, Internet, monitoreo, seguridad, etc.
- La susceptibilidad de la red a recibir interferencias eléctricas externas, lo que termina en degradación de la calidad de imagen y servicios.
- Inducción de energía o descargas eléctricas a través del cable coaxial, lo cual puede dañar equipos de la red externo y electrodomésticos de los clientes.
- Un problema que a nivel nacional se esta volviendo muy grave es el robo de cable para sustraer el cobre. Esto se convierte en fallas masivas que dejan a los clientes sin servicio y eleva los costos de inversión de la empresa ya que necesita reponer el cable e invertir en tiempo por parte del personal técnico para levantar los servicios, sin poder evitar que el problema vuelva a repetirse.
- Mantenimiento constante en los equipos activos ya que estos pueden variar sus niveles y disminuir la calidad de los servicios en *forward* y retorno.
- Debido al espectro de frecuencia que se utiliza para la banda de retorno, esta es muy susceptible a la aparición de ruidos eléctricos que interfieren con las portadoras que transmiten los servicios a los clientes. El rastreo de estos ruidos puede llevar desde 2 horas hasta varios días para poder identificar el origen de la falla. Dentro de las posibles causas de estos ingresos de ruidos a la red son: cables dañados en la red externa, conectores dañados en planta externa, planta interna o en la misma casa del cliente, equipos dañados en planta externa, planta interna o equipo instalado en la casa del cliente,

conexiones piratas que no cumplen con las normas mínimas de calidad de instalación de servicio que utilizan elementos de baja calidad, etc.

- La conexión de clientes piratas en zonas donde la señal de video no sea codificada. Esto permite a las personas conectarse en cualquier punto de la red, utilizando cualquier tipo de método, desde dañar el cable coaxial principal hasta conectarse directamente a un *tap* de distribución.

Cabe mencionar que la red externa tiene poco control sobre las señales generadas en el *headend*. Como ejemplo se puede mencionar la señal de video codificada. La señal codificada es manipulada directamente desde el *headend* y a nivel de planta externa no se utilizan dispositivos decodificadores, por lo que la labor de convertir la señal es ejecutada única y exclusivamente por el receptor instalado en la casa del cliente.

En el caso de los servicios brindados a los clientes, la única forma de limitarlos o eliminarlos es con el uso de filtros, como se explico antes, o que la misma red no este capacitada para manejar los rangos de frecuencia adecuados. De igual forma no tiene la capacidad de adicionar servicios o señales validas como las que fueron generadas en el *headend*.

Como ultima clasificación se tiene la arquitectura *FTC* o fibra hasta la esquinas. Este diseño se basa en el uso de fibra óptica hasta cierta ubicación en la calle para luego utilizar un nodo que se encargue de convertir las señales ópticas. Esta arquitectura es totalmente pasiva por lo que puede cubrir alrededor de 30 clientes por nodo. Dentro de sus limitantes se encuentra la gran cantidad de fibras ópticas a utilizar en una zona geográfica que tenga alto nivel de penetración de ventas de los servicios.

Las arquitecturas anteriores entran dentro de la clasificación de redes *HFC* ó *Hybrid Fiber/Coax*, ya que combinan en la distribución de señales la fibra óptica y el cable coaxial. Como se ha explicado, la fibra óptica sustituye la mayoría de amplificadores troncales necesarios para cubrir un área geográfica de proporciones grandes.

4.3.2 Dispositivos de planta externa que utilizan fibra óptica

Dentro de la distribución de señales, sean estas de *forward* o retorno, es necesario un dispositivo en planta externa que sirva como interfaz entre los medios utilizados para el flujo de las señales. A este dispositivo se le conocerá como nodo, el cual permite convertir la señal óptica transmitida desde el *headend*. El comportamiento del nodo es similar al de un receptor óptico. Por ser un dispositivo eléctricamente activo, es necesario proveerle de energía. En el caso de estudio, es necesario el montaje de fuentes de energía con su respectivo respaldo de baterías para lograr este fin.

Debido a la arquitectura y tecnología utilizada actualmente, se hace uso de un hilo de fibra óptica para recibir en el nodo la señal originada en el *headend* y se utiliza un segundo hilo para poder enviar la información generada por los clientes que el nodo convierte en una señal óptica. En total es necesario de dos hilos de fibra óptica por cada nodo activo en red externa.

CAPITULO V

IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA HASTA EL HOGAR

5.1 Generalidades

La implementación de esta nueva arquitectura de red y tecnología de planta interna esta basada en el primer paso que ha dado la empresa de televisión por cable estudiada, al utilizar fibra óptica en la distribución de su señales tal como se explico en las diferentes arquitecturas de planta externa en el capítulo 4.

El planteamiento de este proceso de migración contempla el gasto necesario para cambiarse de tecnología, por lo que es necesario partir con el uso de los equipos que se tienen actualmente y ver la forma de acoplarlos para la nueva distribución de señal; además no puede ser implementado a nivel general de la red debido a los costos y el impacto hacia los clientes, de tal forma que se elegirán zonas geográficas en la que los clientes cuenten con la capacidad de adquirir los nuevos servicios.

El uso de la fibra óptica hasta el sitio donde se localizan los clientes se remonta al año 1995, donde proveer enlaces de banda ancha era una competencia creciente entre las compañías de telecomunicaciones.

Existen diferentes tipos de arquitecturas de redes en planta externa que permiten la implementación de fibra óptica hasta el cliente y han sido reconocidas por sus siglas en ingles como *FTTx*. Así como se explicó antes, las redes ópticas se basaron en las arquitecturas utilizadas por algunas compañías de televisión por cable en la que se utilizaban hilos de fibra óptica y se combinaban con el uso de cable coaxial para entregar los servicios a los clientes; y debido a la creciente demanda de servicios e información a los clientes han optado por sustituir el cable coaxial por una red completa basada en fibra óptica.

Los servicios provistos a los clientes con la arquitectura *HFC*, tiene sus limitantes implícitas en los dispositivos utilizados y los estándares creados para regularlos. Como ejemplo se puede citar los 36 Mbps que limitan el tráfico ascendente en los sistemas cablemodem *DOCSIS* y *EURODOCSIS* por cada uno de los nodos ópticos.

Todas las ventajas que brinda la fibra óptica frente al cable coaxial es lo que ha permitido depositar la confianza en redes que estén completamente construidas utilizando ese medio de transporte de datos. A nivel internacional la tendencia apunta a que las empresas de cable se van migrando poco a poco al uso de esta arquitectura.

Debido a que la propuesta de este trabajo de graduación esta basada en el uso de una red óptica pasiva o *PON* es necesario dar a conocer alguno de los términos que generalmente se utilizan en estas tecnologías.

Las redes *PON* utilizan una transmisión punto – multipunto. La transmisión de señales se origina en el sitio que hemos denominado *headend*, pero debido al cambio de tecnología a este sitio se le conocerá como unidad óptica terminal de línea o *OLT (optical line terminal)*. Es en este lugar donde se generan las señales a transmitir y se reciben las señales enviadas por los equipos de los clientes, así como también generar la lógica y tiempos determinados en que se moverá la información.

A las terminales instaladas del lado de los clientes se les conocerá como la unidad óptica del usuario ó *ONU*. Por lo tanto la comunicación se realizará entre la *OLT* y las diferentes interfaces ó *ONU's*, instaladas en las zonas seleccionadas para brindar los servicios.

Mas adelante se explicara los detalles del proceso creado para implementar la nueva tecnología y los cambios que involucra a nivel de planta externa y planta interna.

5.2 Proceso

El proceso que se ha creado permite la implementación paulatina de la migración del uso de cable coaxial a fibra óptica hasta el hogar, basándose en el estado actual de la empresa de televisión por cable estudiada.

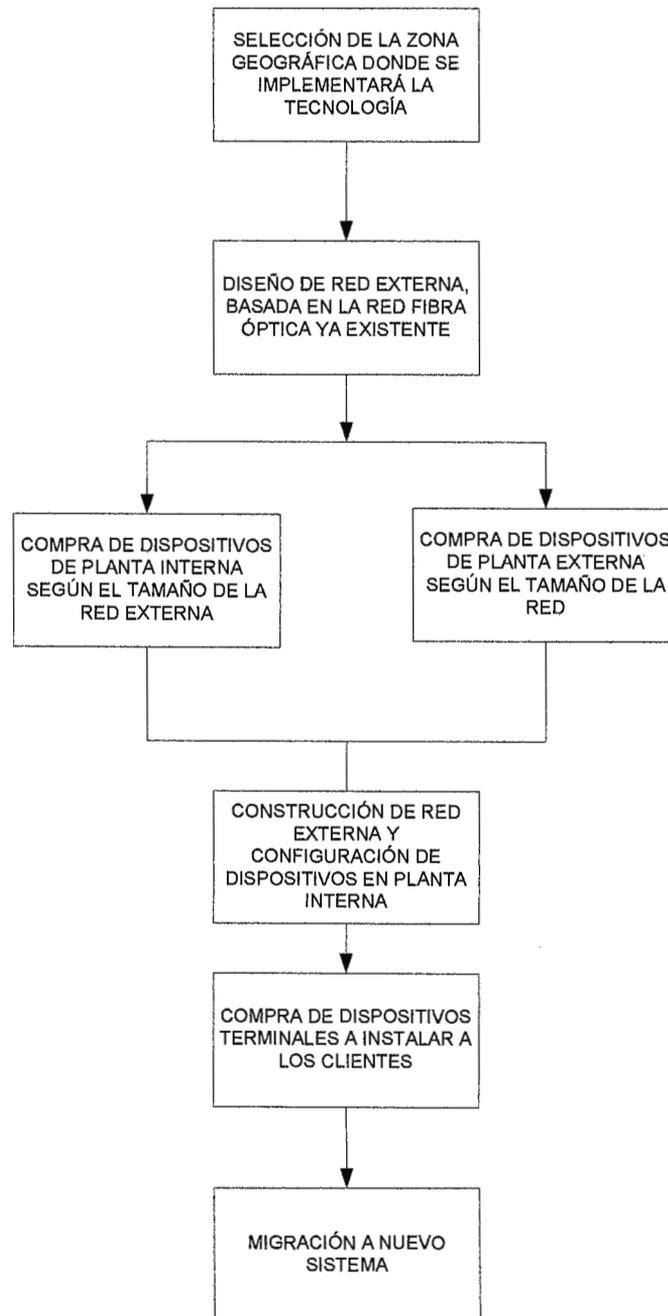


Figura 5.1 Proceso de migración

Debido a los costos que indica la migración a un nuevo sistema, no se justifica de primera mano la compra de un sistema central que controle toda la red de fibra óptica y es por eso que el proceso de migración incluye dos partes y brinda un paso intermedio en la migración total de la red externa y de los equipos de planta interna. A continuación se detalla cada una de las partes que presenta el proceso mostrado en la figura 5.1

5.2.1 Selección de la zona geográfica

La selección geográfica donde se desea implementar la fibra óptica a la casa debe estar justificada por la capacidad económica de los habitantes y de la concentración urbana.

La empresa de cable estudiada posee red a nivel nacional, con la limitante que no toda justifica la implementación de este proceso, pero a su vez permite que en un futuro y debido a los cambios en la tendencia del uso de la tecnología a nivel nacional, el proceso pueda irse extendiendo de forma paulatina. Como punto de partida se ha seleccionada el área metropolitana de San Salvador y las zonas de alto nivel económico de los departamentos aledaños, como ejemplo el departamento de La Libertad

Para este proceso se plantean las siguientes zonas como principales donde pudiera implementarse:

- Urbanización Santa Elena y zonas aledañas.
- Colonia Escalón y zonas aledañas.
- Colonia San Francisco.

La cantidad de clientes por zona con los que cuenta la empresa de cable estudiada no puede ser mencionada de forma específica ya que es información confidencial y de uso privado.

Por lo que para el presente trabajo de graduación las zonas antes mencionadas son las que a nivel general las empresas y comercios indican como zonas de alto consumo y poder adquisitivo.

5.2.2 Diseño de la red

Este paso comprende el cálculo de los nuevos tramos en fibra óptica a utilizar, incluyendo las reservas, acometidas hacia los clientes y divisores ópticos bidireccionales a utilizar.

Como se mencionó antes, el proceso está basado en la red de fibra óptica existente por lo que la fibra utilizada para llegar a cada uno de los nodos es el primer tramo a utilizar y el resto de la red coaxial existente es la que será sustituida por la fibra óptica.

Los parámetros principales a considerar deben ser los siguientes:

- Cantidad de hilos de fibra óptica a utilizar según la cantidad de clientes.
- Diseño de red externa basada en la red coaxial ya existente. Por lo que las distancias en la fibra principal será aproximadamente la misma a la de la red coaxial.

A nivel de la empresa, se cuenta con una ventaja que es la experiencia con la que se cuenta en el diseño y trabajo con redes de fibra óptica, por lo que no involucra un costo adicional la necesidad de capacitar al personal de construcción o contratistas.

5.2.2.1 Redes ópticas pasivas

Las redes ópticas pasivas están basadas en el uso total de fibra óptica como medio para transmitir señales. La característica principal de estas redes es que las señales ya no van diferenciadas por frecuencias como se hacía en el cable coaxial, en esta nueva arquitectura las señales viajan a diferentes longitudes de onda.

Las redes *PON* poseen tres topologías principales, con el objetivo de maximizar su cobertura y disminuyendo los efectos de las pérdidas ocasionados por los divisores ópticos y otros dispositivos. Las tres versiones que se han estandarizado son las siguientes:

- *Ethernet PON* ó *EPON*.
- *Broadband PON* ó *BPON*.
- *Gigabit PON* ó *GPON*.

Todas las anteriores topologías utilizan diferentes longitudes de onda para sus señales, una longitud de onda para el *upstream* y otra para el *downstream*.

A nivel de aplicación existen dos formas en la que puede fluir la información a través de las redes, estas son:

- Utilizando división de tiempo para acceder a la red, lo cual se conoce como *Time division multiplexed PON* ó *TDM-PON*.
- Utilizando diferentes longitudes de onda para transmitir diferentes señales al mismo tiempo, a esto se le conoce como *wavelength division multiplexing PON* ó *WDM-PON*.

En las *TDM-PON* el ancho de banda disponible es limitado por el tiempo que se comparte en cada una de las casillas de transmisión de datos.

Las *WDM-PON* son planteadas como el siguiente paso después de las *TDM-PON*, en esta configuración de red se utilizan dispositivos que pueden ser ajustados a diferentes longitudes de onda. Se vuelve un poco sensible al correr el riesgo de hacer chocar dos señales que viajen a diferentes longitudes de onda.

La tabla 5.1 muestra una comparación general de cada una de las redes ópticas pasivas.

	EPON	BPON	GPON	WDM-PON
Estándar	IEEE 802.3a	ITU G.983	ITU G.984	Ninguno
Transferencia de datos	Ethernet	ATM	GFP/ATM	Protocolo independiente
Máximo ancho de banda	1 Gbit/s	622 Mbit/s	2.488 Gbit/s	1-10 Gbit/s por cada longitud de onda
Promedio de ancho de banda por usuario	60 Mbit/s	20 Mbit/s	40 Mbit/s	1-10 Gbit/s
Transmisión de video	RF/IP	RF	RF/IP	RF/IP
Costo estimado	Bajísimo	Bajo	Medio	Alto

Tabla 5.1 Comparación entre arquitecturas *PON*.

El uso de una red óptica pasiva dentro del proceso de migración se aproxima mucho al uso, en un primero momento, de diferentes longitudes de onda para enviar y recibir señales. Esto indica utilizar una longitud de onda para el video, otra para los servicios de Internet y datos. Debido a que este proceso busca presentar el menor costo posible para la empresa que lo implemente, se invertirá más en multiplexar señales a diferentes longitudes de onda para después dar paso a un sistema completo en el que se puedan dejar de lado los transmisores y receptores individuales y montar un equipo capaz de manejar todos estos parámetros.

En relación a las dimensiones actuales de cada nodo, es necesario aclarar que no se pueden dar a conocer a profundidad detalles técnicos ni de la cartera de clientes de

la empresa que se está estudiando; pero la tendencia es a que el área geográfica de los nodos no sea demasiada extensa limitada primero por la cobertura de los equipos a utilizar y se recomienda utilizar distancias entre 10 y 20 kilómetros. En el caso de ampliar la cobertura hacia otras zonas del país es necesario el uso de un transporte exclusivo para datos y video hasta llegar a una zona céntrica al lugar donde se quieran brindar los servicios. Como ejemplo si se quieren brindar servicios en la zona de Soyapango y aledañas, se recomienda instalar un sitio con equipos dentro de esa zona para distribuir las señales y de esa forma ir ampliando la cobertura de servicios.

El proceso no indica realizar los cambios a nivel general de una sola vez, por lo que el proceso será pausado dependiendo del acuerdo de la empresa a implementar la nueva tecnología en las zonas antes propuestas.

5.2.3 Compra de dispositivos de planta interna según el tamaño de la red externa.

Debido a que el proceso se realizará paulatinamente, la compra de equipos en planta interna involucra los siguientes dispositivos:

- Transmisores a una longitud de onda específica para enviar señales a los nodos. Siendo estos de la capacidad apropiada para superar la distancia y las pérdidas por acoplamientos a dispositivos multiplexores ópticos.
- Receptores para la señal de retorno. Estos equipos deberán ser capaces de recibir las señales a longitudes de onda diferentes a las que fueron transmitidas.
- Multiplexores ópticos. Para el caso del presente estudio se pueden utilizar los modelos *DWDM* que se están utilizando actualmente.

La configuración de los equipos sería de la siguiente forma.

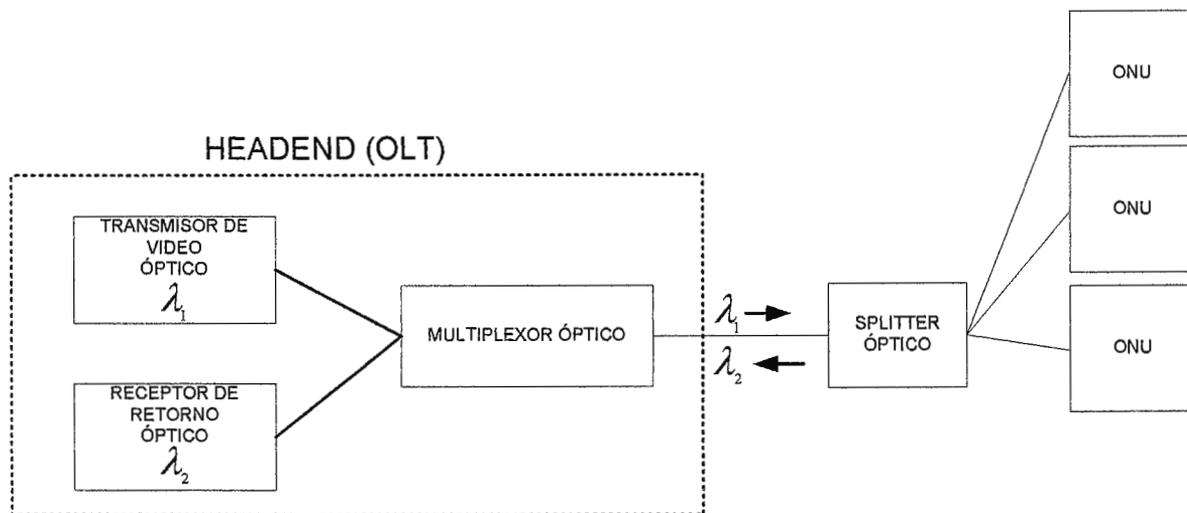


Figura 5.2 Configuración de equipos en planta interna

La figura 5.2 muestra la configuración de equipos a realizar en la primera etapa de implementación del proceso a nivel de planta interna. Se utilizarán transmisores ópticos utilizando una longitud de onda λ_1 en donde se enviarán las señales de video, señales de control y monitoreo, señales de voz y datos. Esta configuración permite la opción de incluir equipos extras que permiten el uso de otras longitudes de onda y brindar servicios de voz y datos en banda ancha.

El uso de los equipos existentes es mientras se logra acoplar y distribuir la nueva red a más puntos. En la actualidad existen dispositivos dedicados a la distribución de señales en redes ópticas pasivas, concentrando los servicios de video, voz y datos.

Dentro de los cambios necesarios a realizar en planta interna, una vez se complete la migración y se entre de lleno a la tecnología y servicios de fibra hasta el hogar, es la capacidad de brindar video completamente digital, video IP, servicios de video bajo demanda y todas las variantes nuevas que día a día la tecnología permite.

Para lograr este objetivo final en la parte de video se necesitan cambiar varios parámetros dentro de *Headend* en el caso de recepción de señales de video análogo. Se deben cambiar todas las señales análogas de video a una recepción de señales digitales.

En la actualidad existe la posibilidad de instalar servidores dedicados completamente a almacenar video en formato digital, el cual permite a los suscriptores tener acceso a esa información. La revolución respecto a las nuevas tecnologías que pueden aplicar las compañías de televisión por cable cada vez son mayores y la capacidad de los clientes de poder acceder a mayor información al mismo tiempo van de la mano.

Para el caso de datos y voz, la fibra óptica permite un ancho de banda bondadoso para brindar este tipo de servicios. Desde servicios E1 y T1 hasta la nueva tendencia en tecnología con servicios *GbE (Gigabit Ethernet)*.

Las redes integradas ópticas poseen la capacidad de explotar por completo cada uno de los servicios brindados a los clientes, creando una nueva cultura en el manejo y capacidad de intercambiar información.

El primer paso puede ser dado utilizando los equipos ya existentes, pero existen soluciones brindadas por diferentes empresas de telecomunicaciones, en el los equipos ya se encuentran capacitados para poder manejar todos los servicios. A continuación se menciona una de las tantas opciones que existen en el mercado.

Dentro de estos equipos ya existentes se encuentran los que brinda la empresa *Blonder Tongue Laboratories inc.* Esta compañía se dedica a brindar soluciones a empresas de telecomunicaciones en general, enfocándose un poco mas a empresas de televisión por cable.

El equipo que propuesto es el BSMC-24P el cual posee 24 puertos ópticos para señales *ethernet* y un puerto para insertar una señal óptica proveniente de un transmisor de video, demostrando de esta forma la capacidad de multiplexar señales. La figura 5.3 muestra el equipo antes mencionado.



Figura 5.3 BSMC-24P de *Blonder Tongue Laboratories inc.* ⁽⁸⁾

Dentro de las principales características de este equipo se encuentran:

- Manejo de red, *SNMP*, acceso Web basado en *http* y *telnet*.
- Capacidad de manejo de los siguientes protocolos y estándares: de los establecidos por la *IEEE*: 802.3, 802.3u, 802.3z, 802.3ab, 802.3ah, 802.1d, 802.1p, 802.1q, 802.1v, 802.3ad, 802.3x. De *IEFT (Internet Engineering Task Force)* los siguientes: *RFC1157 SNMP*, *RFC 1112/2236 IGMP*, *RFC854 Telnet*, *RFC 1123/1493/1643 MIB*.
- Puertos ópticos 100Base-BX10 que permiten ser multiplexados con señales ópticas de video. La multiplexación de señales las realiza el equipo internamente.
- Utiliza una longitud de onda de 1550 nm para video y 1310 nm para datos.

Este equipo es una de las opciones que se acoplan a la propuesta de migración ya que permite la integración con los transmisores de video existentes y la implementación de nuevos equipos para servir video y voz.

Esta empresa también propone el uso de otro tipo de transmisor. El modelo es FIBT-10-1550. Este transmisor puede acoplarse al equipo BSMC-24P.



Figura 5.4 Transmisor FIBT-10-1550 de *Blonder Tongue Laboratories inc.*⁽⁸⁾

La figura 5.4 muestra un transmisor a 1550 nm para transmitir señales de video, sus características principales son:

- Potencia óptica de salida de 10 dBm.
- Trabaja a una longitud de onda de 1550 nm.
- Capacidad de ancho de banda que va desde los 48 MHz hasta los 870 MHz.

5.2.4 Compra de dispositivos de planta externa.

Debido a que este proceso utilizara como base la red de fibra óptica que la empresa de televisión por cable tiene, la necesidad extra en compra es la de la fibra óptica con mayor cantidad de hilos, según sea la cantidad de clientes a servir.

En la actualidad se construyen diferentes tipos de fibra óptica y con diferente cantidad de hilos por lo que es posible

De la forma como se explico en el diseño de red, los cambios de planta externa están sujetos a la zona y tamaño de la red, por lo que los dispositivos a utilizar en planta externa son:

- Divisores ópticos aptos para ser instalados en planta externa.
- Fibra óptica de “n” cantidad de hilos, el cual dependerá de la zona a donde se prestarán los servicios.
- Cajas de empalme con la capacidad requerida para manejar las nuevas cantidades de fibra óptica.

Como se explicó, en el capítulo anterior, el estado actual de la red es tal que utiliza dispositivos amplificadores para poder brindar una cobertura específica en una zona geográfica, para el caso de esta implementación y como se dijo antes se utilizaran redes pasivas, no es necesario utilizar amplificadores ópticos en planta externa.

Dentro de los divisores ópticos a utilizar, estos deben ser capaces de utilizar el menor espacio posible y proveer un alto desempeño. La norma propuesta por la *ITU (International Telecommunication Union)* en *ITU-T G.938.1*, indica que los divisores ópticos, utilizados en *FTTH*, deben tener la capacidad de trabajar en las siguientes longitudes de onda:

- 1310 nm. Señal de transmisión del servicio de voz y datos.
- 1490 nm. Señal de recepción del servicio de voz y datos.
- 1550 nm. Señal de transmisión de video.

Las longitudes de onda a utilizar son especificadas por los equipos instalados en planta interna.

Las dimensiones de los divisores ópticos también es otro factor importante dentro de la implementación. La figura 5.5 muestra uno de estos dispositivos.



Figura 5.5 Divisor óptico para planta externa. ⁽⁹⁾

Las empresas distribuidoras de equipos para redes *PON*, también recomiendan el uso de gabinetes, similares a los utilizados por las empresas de telefonía, de esta forma pueden proveer un sitio para instalar los equipos de planta externa y marcar el punto de inicio para distribuir la señal hacia los clientes.

Como ejemplo, la figura 5.6 muestra un divisor óptico 1x32, que por lo general es uno de los más utilizados en redes pasivas ópticas dedicadas a implementar *FTTH*.



Figura 5.6 Divisor óptico 1x32 construido por *FDK America Inc.* ⁽¹⁰⁾

La referencia 11 muestra un catalogo de todos los dispositivos más recientes que se están utilizando para la red externa en las *PON*'s.

5.2.5 Construcción de red externa

La construcción de la red está basada en el uso actual de la ruta de cable coaxial, por lo que será necesario únicamente tender los nuevos tramos de fibra óptica. Dentro de las configuraciones y tipos de fibra óptica existen las que pueden autosostenerse y las que necesitan un cable de acero para soportarse en ellos.

Para el proceso de migración se recomienda el uso de cable de acero para sostener la fibra ya que como se especificó en los dispositivos de planta externa, en determinadas situaciones será necesario instalar divisores ópticos.

Al igual que cualquier dispositivo metálico en planta externa, es necesario polarizar los cables de acero o dispositivos mecánicos que sostengan la fibra, esto con el propósito de evitar cualquier descarga eléctrica que pueda dañar la fibra óptica.

La experiencia con que cuenta la empresa que se ha tomado como estudio hace fácil la construcción de una nueva red basada en fibra óptica.

En la actualidad existe el uso de postes propios y alquilados, para transportar el cable coaxial y fibra óptica. Este costo no representará incremento ya que el diseño de la red utilizará los mismos tramos que la red coaxial.

El concepto de tener una red basada en fibra óptica, permite el crecimiento de la compañía a no solo servir televisión sino, proveer servicios a clientes grandes ya que la disponibilidad de hilos de fibra óptica en la red crece en grande manera. De tal forma que la cartera de clientes ya no solo se limitará a clientes domésticos sino que podrá incluir a grandes empresas, brindándoles nuevas opciones de acceso a la red de Internet, interconectividad entre sus sucursales, etc.

5.2.6 Compra de dispositivos a instalar a los clientes.

Los dispositivos a instalar en los clientes deben ser capaces de interpretar señales ópticas en cada una de las longitudes de onda asignadas. La configuración de los dispositivos es la siguiente.

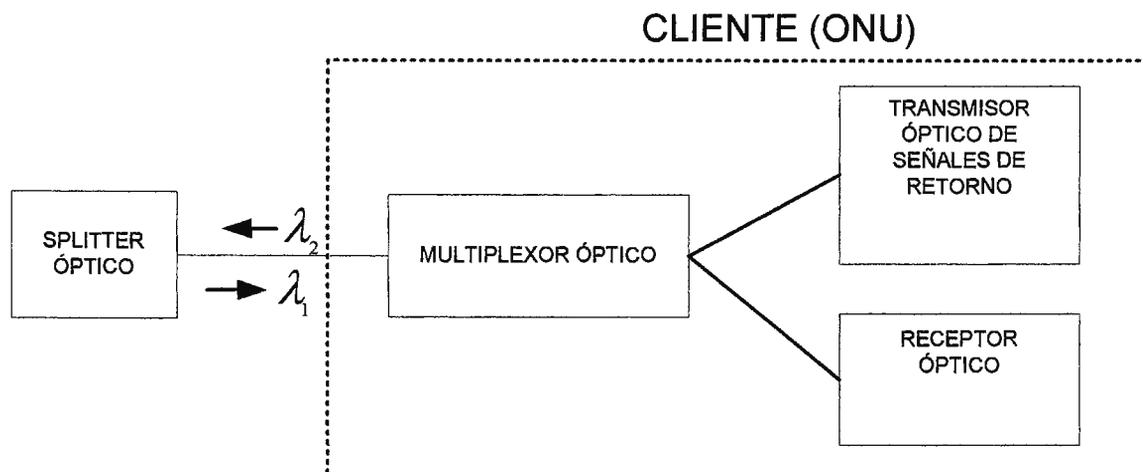


Figura 5.7 Dispositivo instalado a los clientes.

La figura 5.7 muestra la configuración y el funcionamiento general que debe de tener el dispositivo a ser instalado en la casa de los clientes.

En el caso de las cajas sintonizadoras o decodificadoras de video, como primer paso se utilizarán las mismas. Como a futuro las señales de video serán casi en un 100% digitales será necesario el uso de nuevas cajas para decodificar las señales de video. Para los servicios de Internet y voz será necesario el uso de nuevos dispositivos. Actualmente los equipos que se encargan de gestionar los servicios de telefonía e Internet son los cablemodems, con este nuevo proceso de migración será posible seguirlos utilizando en un inicio, pero para ir brindando otros servicios de mayor ancho de banda a los clientes será necesario el uso de otros dispositivos que permitan agotar las nuevas posibilidades que brinda la nueva arquitectura de red y equipos a implementar.

Una vez migrado todo el sistema, la compañía *Blonder Tongue Laboratories inc.* posee unos modelos de equipos que permiten ser instalados en el hogar de los clientes y brindar los servicios de voz, datos y video. Este dispositivo es el modelo *Beacon Series BSONU-4*.

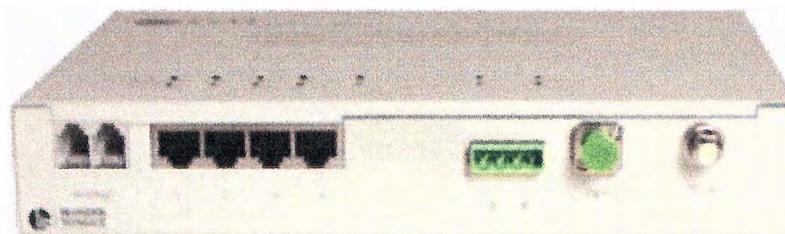


Figura 5.8 BSONU-4 de *Blonder Tongue Laboratories inc.*⁽⁸⁾

La figura 5.8 muestra un equipo que podría ser utilizado para instalarlo en la casa de los clientes y brindar los servicios. Este equipo posee las siguientes características:

- Posee un puerto 100Base FX que permite la multiplexación de señales de video y datos.
- Puertos 10/100 Base TX.
- Puertos RJ11 para distribución de telefonía.

Un puerto de distribución de señal de televisión por cable, para señales desde 45 MHz hasta 870 MHz.

5.3 Comparación de costos

El análisis de costos actuales que se presentan en este trabajo es una aproximación al costo real, pero se debe tomar en cuenta que la información puede variar según el proveedor que utilizan.

La tabla 5.2 muestra el costo aproximado que implica transmitir señal a un nodo situado a unos 10 Km del *headend*, tomando en cuenta equipos de planta externa y planta interna.

Inversión aproximada para un nodo a 10 Km de Headend

EQUIPO	CANTIDAD	COSTO POR UNIDAD (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Transmisor óptico	1	\$ 3,000	\$3,000.00
Receptor óptico	1	\$ 1,500	\$1,500.00
Divisor óptico	1	\$ 400	\$400.00
Fibra óptica	10,500	\$ 0.30	\$3,150.00
Cable coaxial	12,000	\$ 0.45	\$5,400.00
Amplificadores troncales	4	\$ 800	\$3,200.00
Amplificadores de línea	4	\$ 400	\$1,600.00
Fuente para alimentar equipos activos en la red externa.	2	\$ 2,200	\$4,400.00
Baterías para fuentes de planta externa.	12	\$ 120	\$1,440.00
Conectores para cable 860	350	\$ 3.50	\$1,225.00
Divisores y acopladores	35	\$ 21	\$735.00
Filtros de combinación de señal y energía	2	\$ 25	\$50.00
Atenuadores para amplificadores	100	\$ 0.90	\$90.00
Ecualizadores para amplificadores	100	\$ 5	\$500.00
Taps	100	\$ 20	\$2,000.00
Nodo óptico	1	\$ 2,900	\$2,900.00
Vehículos	1	\$ 8,000	\$8,000.00
Soportes para postes	175	\$ 2.80	\$490.00
Otros materiales de construcción			\$1,000.00
Materiales para polarización de postes			\$1,800.00
Gastos por postes	10	\$ 15.00	\$150.00
Herramientas de planta externa			\$950.00
Equipos de medición de planta externa y planta interna	4	\$ 3,800	\$15,200.00
Plantas eléctricas móviles	2	\$ 4,600.00	\$9,200.00
Total			\$43,030.00
Imprevistos			\$6,454.50
Total Inversión			\$49,484.50

Tabla 5.2 Costos de inversión aproximados por nodo.

De la tabla anterior se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Los precios son aproximados y se han tomado de algunos distribuidores de equipos para compañías de televisión por cable a nivel internacional, entre estas tenemos: *Alpha, FIS, AGS, C COR, Motorota, DIGICOM, etc.*
- Los costos son aproximados y pueden variar debido a las cantidades de material y equipos pedidos a los distribuidores.
- Debido a confidencialidad de la empresa, la cantidad y tipos de equipos pueden variar según la configuración y construcción del nodo.
- La tabla detalla información para un nodo que se encuentra aproximadamente a unos 10 Km de distancia del *headend*.
- Los costos de envío y transporte local están contemplados de forma aproximada en la celda de costos varios.

Como se explicó anteriormente, por el tipo de arquitectura de red que se utiliza y los dispositivos de planta interna, con un mismo transmisor pueden ser alimentados más de un solo nodo, por lo que la inversión por equipos en planta interna se refleja una sola vez. De igual forma la fibra óptica lleva a más de un nodo, de tal forma que de la “n” cantidad de hilos de fibra óptica solo se utilizan dos por nodo, por lo que con una fibra óptica de 48 hilos se podrían alimentar hasta 24 nodos.

Un factor que no se ha tomado en cuenta, pero si es de mucha importancia es el de mantenimiento de red externa. Debido al uso actual de cable coaxial en planta interna el pago de horas extras y de personal de turno para atender cualquier tipo de falla, es considerable. No es porque al momento de lograr la migración a una red completamente de fibra óptica se tenga que despreciar este costo, pero actualmente el tiempo necesario para ubicar un problema en planta externa necesita una inversión de tiempo muy alta; mientras al lograr la red *PON* no será necesario invertir tiempo en la búsqueda de ruidos o perturbaciones eléctricas en la red, que causen caídas de tráfico o comunicación entre los clientes. El pago de horas extras al personal de mantenimiento de planta externa se verá disminuido ya que no se

tendrá que invertir mucho tiempo en búsqueda de fallas, en alimentar con plantas eléctricas las fuentes que alimentan a los nodos o equipos activos de la red.

La tabla 5.3 muestra un aproximado de los costos para implementar *FTTH*. Es de tomar en cuenta que los precios de los dispositivos de comunicaciones no son publicados abiertamente, sino que son acordados directamente con los vendedores según la cantidad, empresa que los compre y el destino.

Inversión aproximada para una cobertura de 10 Km desde el Headend

EQUIPO	CANTIDAD	COSTO POR UNIDAD (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Transmisor óptico	1	\$3,000	\$3,000.00
Amplificador óptico	1	\$12,000	\$12,000.00
Equipo de integración para voz y datos	1	\$30,000	\$30,000.00
Divisor óptico de planta externa 1x32	4	\$200	\$800.00
Divisor óptico de planta externa 1x4	1	\$150.00	\$150.00
Fibra óptica	15,500	\$0.30	\$4,650.00
Vehículos	1	\$8,000	\$8,000.00
Soportes para postes	130	\$2.80	\$364.00
Otros materiales de construcción			\$1,000.00
Materiales para polarización de postes			\$1,800.00
		\$	
Gastos por postes	10	15.00	\$150.00
Herramientas de planta externa			\$950.00
Equipos a instalar a los clientes	130	\$700.00	\$91,000.00
Equipos de medición de planta externa y planta interna	4	\$5,000	\$20,000.00
Cajas de empalme	40	\$100.00	\$4,000.00
Total			\$177,864.00
Imprevistos			\$26,679.60
Total Inversión			\$204,543.60

Tabla 5.3 Costos aproximados para brindar servicio *FTTH* a 128 clientes.

La tabla 5.3 muestra los costos aproximados para brindar servicios a una base de 128 clientes.

La referencia 12, muestra información sobre los costos mas apegados a la realidad y el costo que significa a los clientes cada servicio según la tecnología utilizada.

5.4 Implementación

El primer paso para implementar fibra hasta a la casa será utilizar algunos de los equipos existentes en planta interna y tramos existentes de fibra óptica como medio de transporte.

La primera opción es multiplexar, en planta interna, las diferentes señales de los servicios que se van a brindar utilizando los mismos transmisores para video y agregando los equipos para los servicios de Internet y voz.

Los servicios que se prestan actualmente en la parte de video son: video digital, pago por evento, guía interactiva. En alguno de estos casos es necesario retornar cierta información. Al momento de la implementación, debido a la clase de clientes, se les puede brindar un paquete especial sin restricciones de canales ya que el fuerte del nuevo servicio es brindarle al cliente una calidad superior en las señales y la capacidad de obtener servicios nuevos como Internet de banda ancha con velocidades muy superiores a las que existen actualmente en el mercado local.

La parte de datos, actualmente se esta sirviendo a través de cable módems como se explicó anteriormente. Esto tiene sus limitantes en cuanto a la capacidad de servir velocidades máximas de 1 Mb/seg y en casos extremos se puede llegar hasta los 2 Mb/seg. Estas limitantes vienen dadas por el protocolo que se está utilizando para brindar los servicios, la saturación del espectro de frecuencias utilizado, el tipo de modulación utilizado siendo este un de los pasos fundamentales para cambiar la velocidad brindada a lo clientes. La capacidad de migrarse de un tipo de modulación digital a otra no es la única limitante ya que al migrarse a otra tecnología que utilice portadoras con menor potencia y mas ancho de banda se vuelven demasiado vulnerables a ser afectadas por ruidos que se generan en toda la banda de frecuencias.

Para brindar el servicio de datos se propone el uso de un sistema completa que permita la interacción entre diferentes clientes al mismo tiempo utilizando *WDM* para la interfaz óptica y *TDM* para el control del flujo de la información.

La figura 5.9 muestra un ejemplo del flujo de la información.

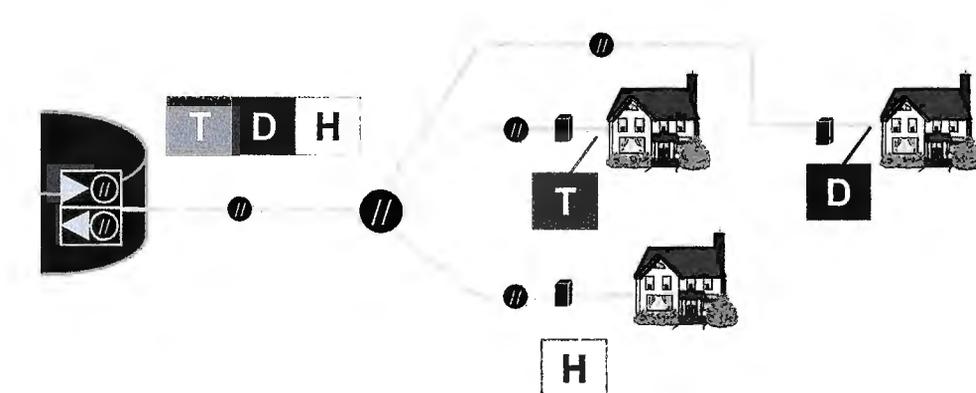


Figura 5.9 Ejemplo del flujo de información para distribuir datos en FTTH.

La figura 5.9 ejemplifica la aplicación distribución del servicio de datos y voz, por lo que un equipo instalado en el *headend* deberá ser capaz de manejar la distribución y orden lógico de la información brindada a los clientes. Se puede decir que la figura 4.5 está basada en las características que posee una red *FTTH* con una aplicación *EPON*. El flujo de esta información es tal que se utilizará una longitud de onda para los datos. La información fluirá distribuida en ranuras de tiempo asignadas a cada uno de los clientes tanto para recibir como para enviar información y se sincronizarán según sea la configuración del equipo central en el *headend*.

El equipo instalado en el cliente debe ser capaz de interpretar toda la información transmitida desde el *headend* y acoplarse a la lógica del flujo de datos.

5.5 Comparación general del nivel de cobertura para una red coaxial y una red pasiva de fibra óptica.

En el capítulo uno y dos se presentaron las características principales de la fibra óptica y del cable coaxial. A continuación se presenta un breve comparación del cable coaxial y la fibra óptica para una distancia en cada uno de estos medios que represente una pérdida por atenuación de línea de 10 dB.

5.5.1 Cable coaxial.

La tabla 5.4 muestra los valores de atenuación que se han tomado como base para la presentación de esta comparación.

Tipo de cable	Tamaño del conductor central (pulgadas)	Frecuencia (MHz)				
		50	350	550	750	865
860	0.203	0.30	0.83	1.06	1.24	1.33
750	0.167	0.35	0.97	1.24	1.48	1.61
540	0.124	0.44	1.23	1.56	1.85	2.00
500	0.109	0.52	1.43	1.82	2.16	2.34
F6	0.040	1.53	3.85	4.90	5.65	6.10

Tabla 5.4 Frecuencia y atenuación para diferentes tipos de cable coaxial. ⁽⁷⁾

La tabla 5.4 muestra el valor de atenuación aproximado para diferentes tipos de cable coaxial frente a diferentes frecuencias.

De lo anterior y por un estudio presentado en un manual de procedimientos de la empresa *Motorola* dedicada a la televisión por cable; las siguientes gráficas muestran la capacidad en distancia que puede alcanzar un cable coaxial, simulando una atenuación de 10 dB.

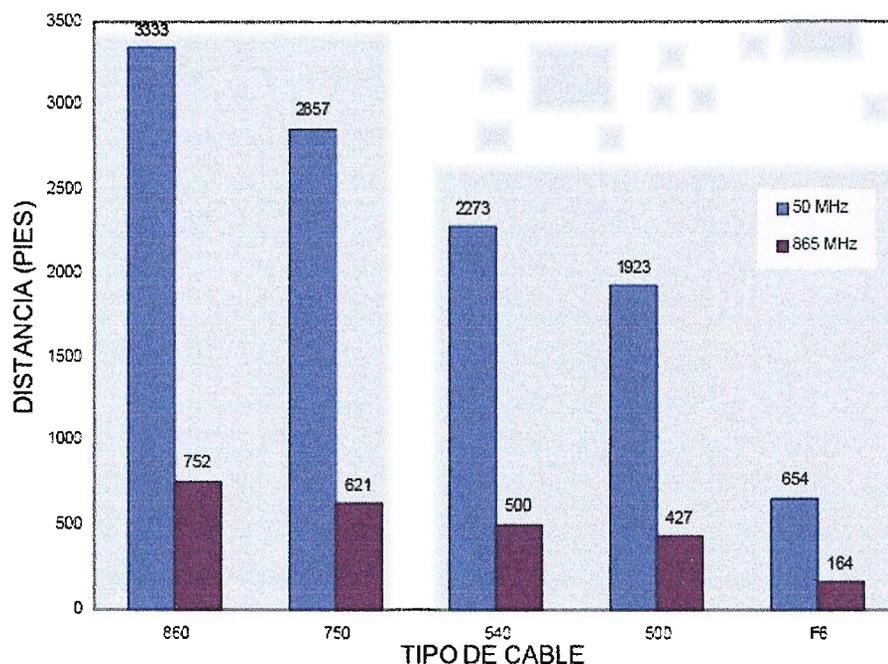


Figura 5.10 Comparación de cable y distancia relacionado a 10 dB de pérdida. (7)

La figura 5.10 muestra la capacidad de cobertura de diferentes tipos de cable coaxial presentando la distancia en pies. Se presenta información a diferentes frecuencias, dentro de las cuales se encuentra el rango de frecuencias que utiliza la compañía de televisión por cable que se ha estudiado.

5.5.2 Fibra óptica

La fibra óptica es medio que permite muchas ventajas en cobertura y servicios a todas las empresas de telecomunicaciones.

Utilizando un manual de procedimientos de Motorota, a continuación se presenta una tabla que presenta valores de atenuación en diferentes longitudes de onda.

La tabla 5.5 muestra los valores de atenuación utilizados para presentar el estudio de cobertura aproximado para la fibra óptica basándose en una atenuación de línea de 10 dB.

Tipo de fibra óptica	Atenuación en dB/Km (dB/3281 pies) a una longitud de onda (nm)		
	850	1310	1550
Monomodo	2.5	0.35	0.21
Multimodo	4.0	0.60	0.45

Tabla 5.5 Tabla de pérdidas según el tipo de fibra y longitud de onda. ⁽⁷⁾

La tabla 5.5 muestra los niveles de atenuación para diferentes tipos de fibra óptica según la longitud de onda de la señal.

De la tabla 5.5 se presenta la figura 5.11 en la cual se muestran los datos de capacidad de cobertura con diferentes tipos de fibra óptica y en diferentes longitudes de onda para una atenuación de 10 dB.

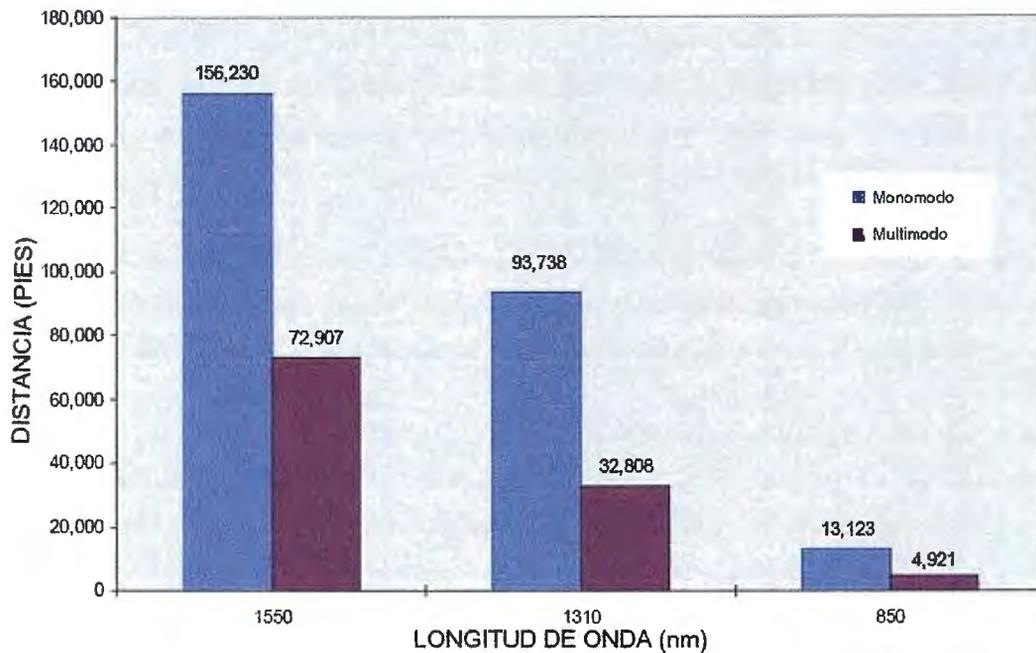


Figura 5.11 Comparación de distancia y cobertura de fibra óptica con una pérdida de 10 dB. ⁽⁷⁾

5.5.3 Cable coaxial vs fibra óptica.

Las características físicas de cada uno de estos medios de transmisión son la base fundamental de su capacidad y ventajas a la hora de implementar un sistema de comunicación.

La comparación que se muestra a continuación se basa en comparar la distancia que se puede avanzar en un medio que presenta 10 dB de atenuación.

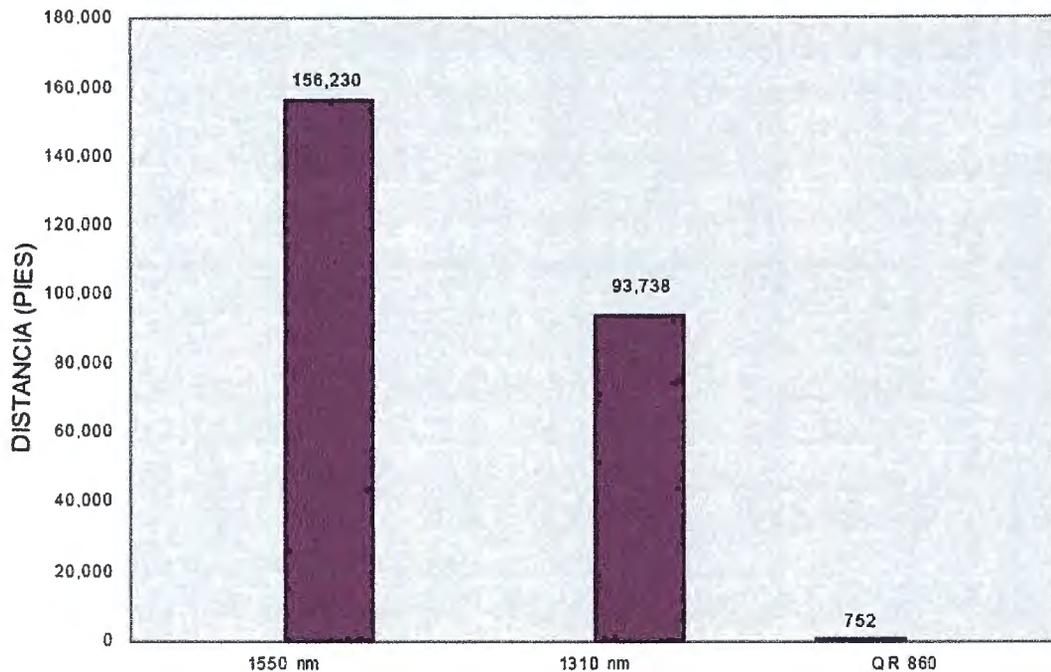


Figura 5.12 Comparación (7)

La figura 5.12 muestra que un cable QR 860 presenta una atenuación de 10 dB a los 752 pies, aproximadamente 1.24 dB/100 pies a 750 MHz, por lo que se hace necesario el uso de un amplificador. En el caso de la fibra óptica en 1550 nm y 1310 nm presentan una atenuación de 10 dB a 156, 230 pies y 93,738 pies respectivamente.

Podemos hacer una comparación del uso de cable coaxial y fibra óptica comparando la necesidad en ambos medios para cubrir una distancia de 93,700 pies.

En el caso del cable coaxial y utilizando cable QR 860 con una atenuación de 1.24 dB/100 pies. Se vuelve necesario el uso de un amplificador que brinda por lo general 29 dB de ganancia, con lo que se puede recorrer 2,339 pies. Para determinar la cantidad de amplificadores necesario para cubrir esa distancia, dividimos los 93,700 pies entre los 2,339 pies, de lo cual resultan 40 amplificadores. En general los 93,700 pies representan 1,162 dB de pérdida.

De lo anterior se puede deducir el nivel de calidad que se reduce al utilizar tantos amplificadores en la red, degradando en grande manera el desempeño total de la red.

Para la fibra óptica, asumiendo que se utiliza una longitud de 1310 nm y que a esta longitud de onda cada kilómetro representa 0.35 dB de atenuación. Una atenuación de 10 dB representan 28.6 Km de fibra óptica, equivalentes a 93,700 pies. Por lo que con una transmisor de esta potencia se puede cubrir esa distancia y mejora enormemente la calidad de señal entregada a los clientes.

5.6 Requerimientos para la nueva red.

Debido a que las necesidades de mantenimiento preventivo y correctivo se vuelven diferentes, a continuación se mencionan algunas de las aplicaciones necesarias para la nueva red a implementar. Aunque la empresa que se ha tomado como caso de estudio ya tiene experiencia en redes de fibra óptica, se mencionan a continuación algunos de los procedimientos aplicados a estas nuevas arquitecturas.

5.6.1 Unión de fibra óptica.

Por diferentes motivos, en una red de fibra óptica siempre es necesario unir hilos de fibra óptica. Esto puede ser aplicado para unir fibras con diferentes cantidades de hilos, usados para dividir los medios en diferentes rutas de tráfico, utilizando cajas de empalme para unir los cables de fibra.

Existen tres métodos utilizados para unir dos hilos de fibra óptica:

- Empalmes de fusión.
- Empalmes mecánicos.
- Haciendo uso de conectores.

5.6.1.1 Empalmes de fusión.

Este método es el que más se utiliza a nivel de redes ópticas pasivas y el más recomendado. Para poder llevar este método a cabo, es necesario preparar la fibra óptica a unir.

Los pasos de preparación se enumeran a continuación:

1. Se elimina la cubierta protectora del hilo de fibra óptica haciendo uso de una herramienta especial denominada peladora o *stripper*. La figura 5.13 representa un par de hilo de fibra en los que ya se ha eliminado la cubierta protectora.

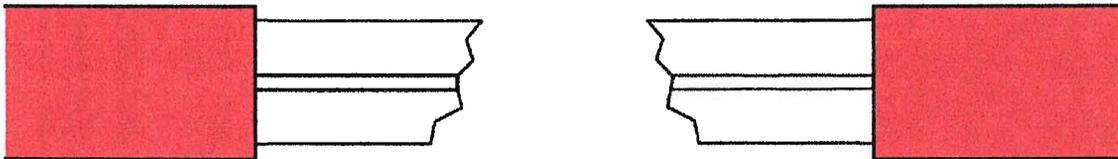


Figura 5.13 Eliminación de cubierta protectora de los hilos a fusionar.

2. Se debe de realizar un corte en los finales de hilos de fibra que se van a fusionar, esto con el objetivo de disminuir casi en un 100% las deformidades geométricas que puedan presentar y de esta forma bajar la calidad del empalme. La figura 5.14 muestra dos hilos antes y después de realizado un corte.

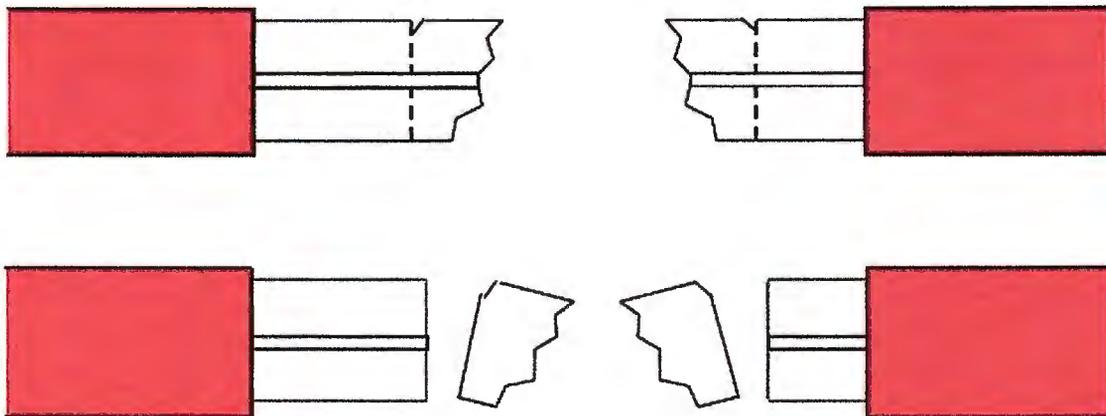


Figura 5.14 Eliminación de deformidades en los finales de los hilos a fusionar.

3. Los hilos son alineados para posteriormente ser aproximados y fusionados. Por lo general este proceso se hace mecánicamente para evitar imprecisiones. La mayoría de máquinas de empalme realizan este proceso. La figura 5.15 muestra dos hilos que ya han sido alineados.

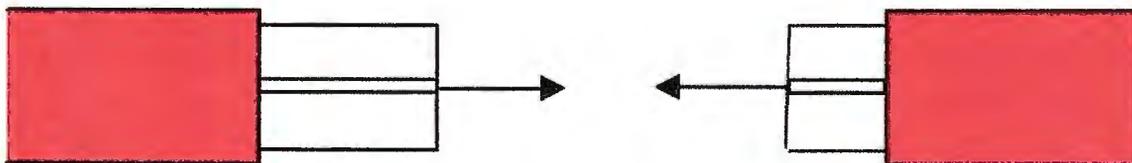


Figura 5.15 Hilos alineados y listos para ser acercados.

4. Una vez los hilos han sido aproximados, la máquina empalmadora posee un electrodo que genera un arco que es capaz de elevar la temperatura y fusionar los dos hilos. La figura 5.16 representa la fusión de los hilos.

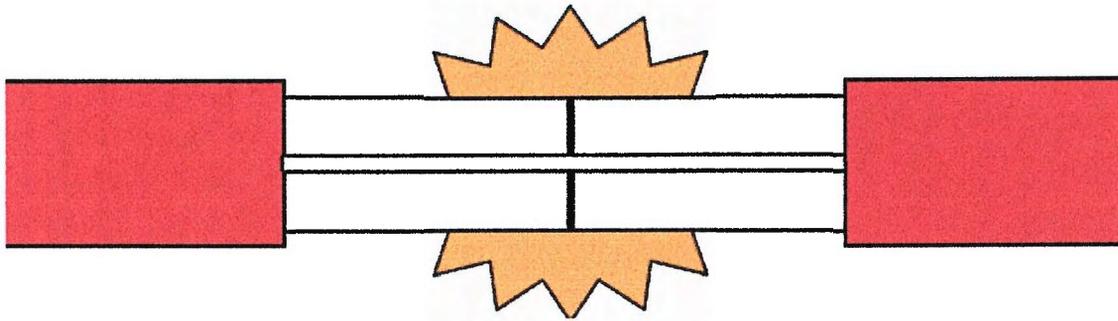


Figura 5.16 Fusión.

5. Finalmente se obtienen una fusión que puede presentar niveles muy mínimos de atenuación que rondan los valores de 0.01 dB hasta 0.05 dB.

Las máquinas empalmadoras pueden variar en diferentes modelos, pero su objetivo es el mismo. El costo de estos dispositivos puede ser elevado pero las empresas lo utilizan como una herramienta primordial por los resultados de alta calidad que se obtienen.

Una de las limitantes en el uso de estos empalmes es que deben realizarse en un ambiente controlado, libre de suciedad, agua y otros efectos climáticos. Esto obliga a las compañías a realizar algunos adaptes en los vehículos de las cuadrillas de fibra.

5.6.1.2 Empalmes mecánicos.

Este tipo de empalmes son utilizados para levantar servicios críticos. Existen varios dispositivos que son utilizados para acoplar los dos hilos de fibra afectados.

La ventaja de este tipo de empalmes es que los dispositivos y herramientas utilizados son de bajo costo y pueden ser utilizados directamente en el campo.

Los empalmes mecánicos como mínimo representan un nivel de atenuación de 0.25 dB, que implica casi un kilómetro para un enlace que utiliza una longitud de onda de 1550 nm.

En la vida real estos empalmes son utilizados temporalmente ya que siempre son sustituidos por empalmes de fusión.

El procedimiento para llevar a cabo este tipo de empalmes tiene pasos en común con los empalmes de fusión.

1. Eliminar la cubierta protectora de la fibra.
2. Cortar las irregularidades geométricas de los hilos a empalmar.
3. Alinear de forma manual los hilos.
4. Instalarlos dentro del dispositivo que proveerá fijeza y estabilidad mecánica.

La figura 5.17 muestra uno de los dispositivos utilizados en los empalmes mecánicos.

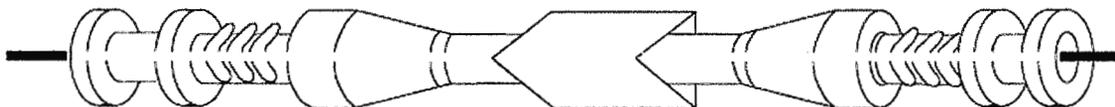


Figura 5.17 Empalme mecánico.

5.6.1.3 Uso de conectores.

El uso de conectores para unir la fibra óptica es el procedimiento que se utiliza por lo general en planta interna. Esto provee conectividad física entre los equipos que utilizan fibra óptica y las bandejas de conexión con la fibra óptica que va hacia la calle.

La figura 5.18 muestra alguno de los conectores utilizados en planta interna.

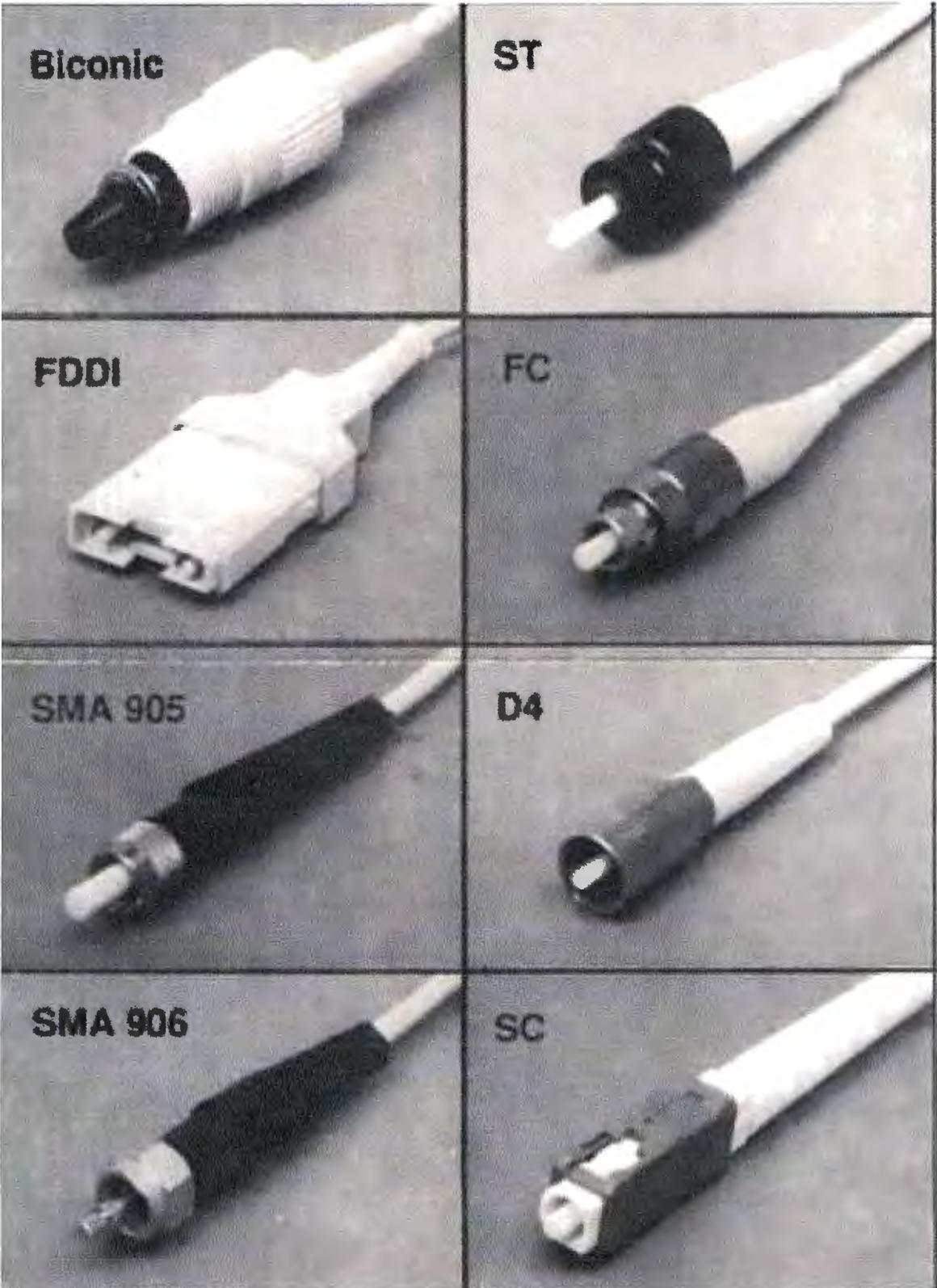


Figura 5.18 Conectores de fibra óptica. (7)

5.6.2 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo.

El *OTDR* ó reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, es una de las herramientas principales en las empresa de telecomunicación.

La figura 5.19 muestra un diagrama de bloques básico de las etapas que componen un *OTDR*.

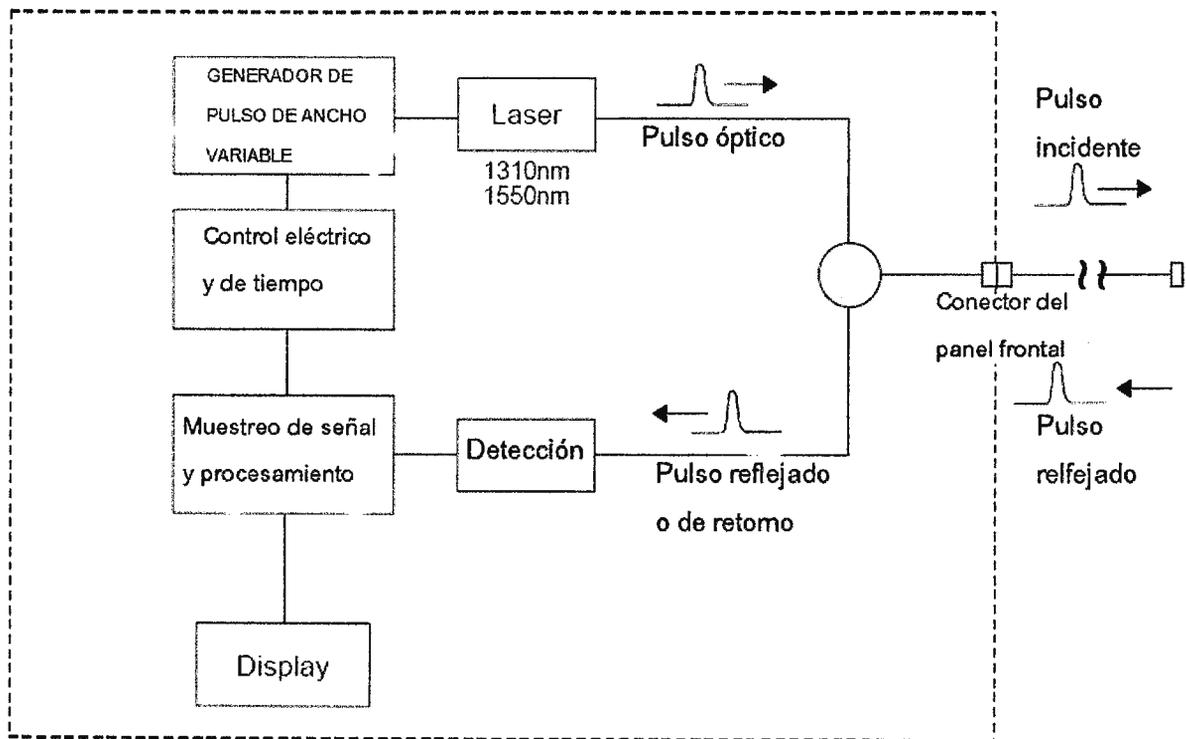


Figura 5.19 Diagrama de bloques de un *OTDR*.⁽⁷⁾

Estos dispositivos son utilizados para:

- Detección de fallas y rupturas en la fibra.
- Medir distancias, atenuaciones, pérdidas y el nivel de reflexión de la onda.
- Es necesario configurar correctamente el índice de refracción de la fibra para obtener buenas lecturas.

La figura 5.20 muestra alguno de los parámetros que obtienen al realizar una medición.

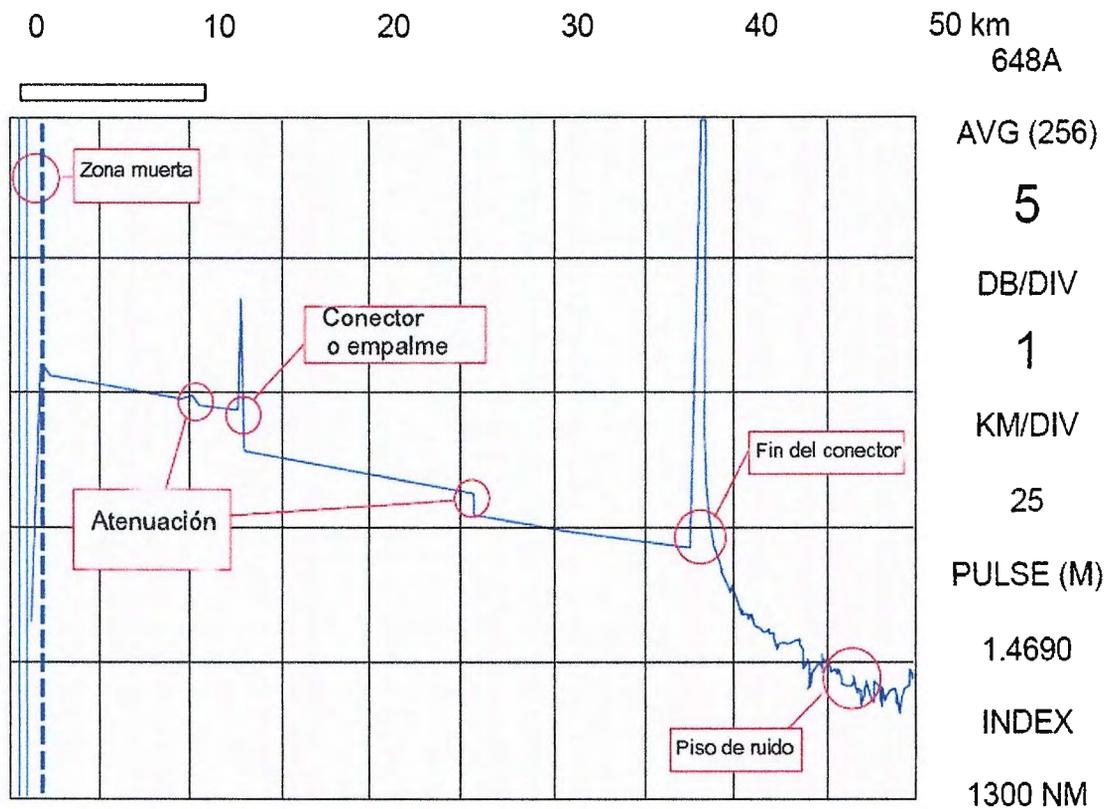


Figura 5.20 Parámetros obtenidos en un OTDR ⁽⁷⁾.

Se puede observar que el barrido que hace el medidor indica con mucha exactitud la posición de alguna falla.

Algunos dispositivos permiten configurar el índice helicoidal de la fibra, para acoplarse de esta forma a la fibra que se está midiendo e indicar con mayor exactitud los puntos de falla o distancias requeridas.

La figura 5.21 muestra una gráficas realizadas a un enlace de aproximadamente 18 kilómetros.

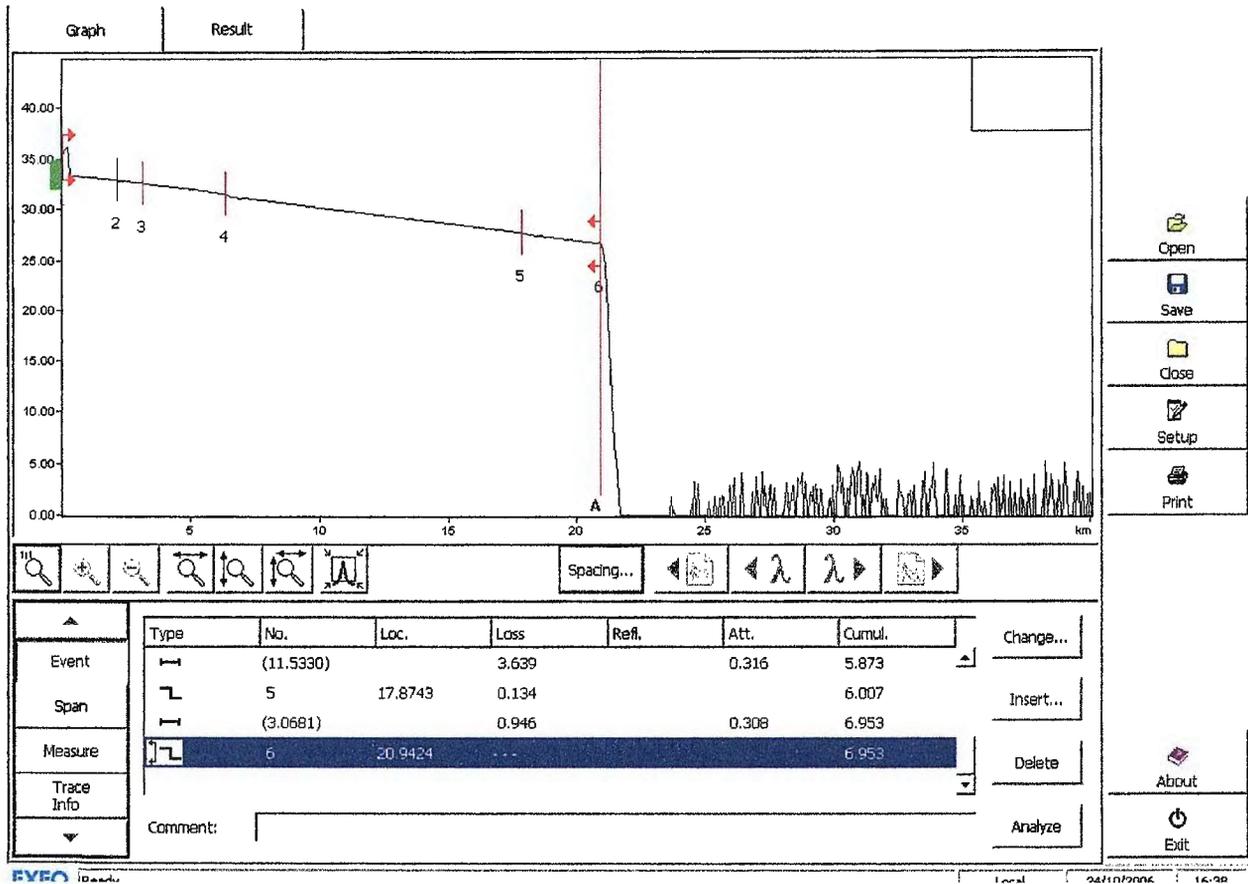


Figura 5.21 Medición

La figura 5.21 muestra una medición realizada con un OTDR marca EXFO modelo FTB 110B.

CONCLUSIONES

- El uso de fibra óptica hasta el hogar significará un ahorro en costos de mantenimiento de red externa, a la empresa que lo implemente; esto debido a que la red será totalmente pasiva y por el uso del medio de transporte no es sensible a interferencias eléctricas que se puedan encontrar en el ambiente.
- La calidad de los servicios a prestar con esta nueva tecnología sobrepasan por mucho en calidad a los servicios que se prestan en la actualidad con la red coaxial.
- La capacidad del monitoreo de los servicios prestados a los clientes se ve incrementada ya que no solo se podrá monitorear parte de la red externa sino también se podrá llegar hasta el hogar del cliente con los nuevos instalados en los hogares.
- La empresa que fue tomada como base del estudio para la implementación de esta tecnología tiene la posibilidad de poder integrar la red coaxial y la nueva red pasiva óptica. Esto permite que se ahorren costos en planta externa y dispositivos de planta interna.

REFERENCIAS

1. Hayt Jr, William. (1991). Teoría electromagnética (5ª edición). México: McGRAW-HILL.
2. Society of cable telecommunications engineers. (2000). Foundations for delivering quality broadband services (1ª edición). Estados Unidos de Norte América: SCTE.
3. Hecht, Jeff. (2002). Understanding fiber optics (4ª edición). Estados Unidos de Norte América: Prentice Hall.
4. M, Kevin. (1998). Optical fiber designs evolve. Desconocido: Desconocido.
5. Anónimo. Obtenido el 29 de agosto de 2006. <http://www.fiber-optics.info/articles/op-amp.htm>
6. Anónimo. Obtenido el 29 de agosto de 2006. <http://www.iec.uia.mx/proy/titulación/proy04/capitulo%20I.htm>
7. Manual de procedimientos de Motorota “Introducción al plan de mantenimiento de red”
8. Obtenido el 12 de enero de 2007. <http://www.blondertongue.com/FiberOptics>
9. *FTTH Council*. Obtenido el 12 de enero de 2007. <http://www.ftthcouncil.org/documents/Passive%20Splitters%20for%20FTTH-PON.pdf>

10. *FDK America Inc.* Obtenido el 12 de enero de 2007.
<http://www.fdk.co.jp/whatsnew-e/release040913-e.html>

11. *Prysmian.* Obtenido el 14 de enero de 2007.
http://www.prysmian.com/en_42/cs/tlc/home.html;jsessionid=012doafkj334vfykiopcfa

12. *Roy Rubenstein y Fibre System Europe.* Obtenido el 23 de octubre de 2006.
http://www.iviht.com/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=23&Itemid=30