

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

PROGRAMA COMPUTACIONAL DIDÁCTICO PARA LA ASIGNATURA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS: TEORÍA, DISEÑO Y SIMULACIÓN

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

AJILA MEDRANO IVAN ALEXANDER

DIRECTOR: ING. ERWIN BARRIGA ALEMAN

Quito, Julio 2002

DECLARACIÓN

Yo, Iván Alexander Ajila Medrano, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley, Reglamento de Propiedad Intelectual y por la normatividad institucional vigente.



Ivan Alexander Ajila Medrano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Iván Alexander Ajila Medrano, bajo mi supervisión.



Ing. Erwin Barriga Alemán

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al Todopoderoso que me ha dado la oportunidad de vivir y concluir mis metas planteadas.

A la Escuela Politécnica Nacional y a sus docentes por el conocimiento impartido.

Al Ing. Erwin Barriga por la acertada dirección en el desarrollo de este proyecto

DEDICATORIA

Especialmente a mis padres, por su cariño y comprensión, que me han servido de fortaleza para culminar los objetivos planteados.

A mis hermanos, por su compañía y apoyo brindados.

A una persona especial, Mónica, por su cariño, apoyo incondicional, tolerancia y consejos que me han servido para salir adelante en los momentos difíciles

CONTENIDO

CAPÍTULO I	ENFOQUE DE LA APLICACIÓN A IMPLEMENTAR MEDIANTE UN PROGRAMA COMPUTACIONAL	
1.1.1	GENERALIDADES.....	2
1.1.1	CONSIDERACIONES PARA LA ELECCIÓN DEL SOFTWARE A... SER UTILIZADO EN EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN	4
1.1.2	CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE	6
1.1.3	INTRODUCCIÓN A MULTIMEDIA TOOLBOOK.....	7
1.1.3.1	El término Multimedia.....	7
1.1.3.1.1	Ventajas de la Multimedia	10
1.1.3.1.2	Desventajas de la Multimedia	10
1.1.3.2	Multimedia Toolbook	12
1.1.3.3	Conceptos Básicos	14
1.2	INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO TEÓRICO	22
1.2.1	BOTONES DE NAVEGACIÓN.....	23
1.2.2	ASIGNANDO CONTRASEÑAS (PASSWORD)	24
1.2.3	BOTONES CON TEXTO DE AYUDA	24
1.2.4	ESCRITURA DE TEXTO EN PÁGINAS	25
1.2.5	HOTWORDS (PALABRAS SENSIBLES)	25
1.2.6	INCLUSIÓN DE GRÁFICOS EN EL LIBRO	26
1.2.6.1	Importando Gráficos	27
1.2.6.2	Inclusión de Ecuaciones Matemáticas	27
1.2.7	ANIMACIÓN DE OBJETOS	28
1.2.7.1	Control de Objetos mediante Comandos	28
1.2.7.2	Comando Window	29
1.2.7.3	Animación por efectos visuales	30
1.2.8	PERSONALIZANDO LA BARRA DE MENÚS	30

1.2.9	COMPLEMENTO DE ANIMACIÓN: AUDIO Y VIDEO	33
1.3	INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN	34
1.3.1	CONTENEDORES (CONTAINERS)	34
1.3.1.1	Listas	35
1.3.1.2	Expresiones	35
1.3.2	COMANDOS DE PREGUNTAS Y REQUERIMIENTOS (ASK AND REQUEST)	36
1.3.3	ESTRUCTURAS DE CONTROL	36
1.3.4	COMANDO DRAW	36
1.3.5	CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN.	37

CAPITULO II MODULO TEÓRICO, CONCEPTOS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, ELEMENTOS DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA.

2.1	INTRODUCCIÓN	
2.1.1	RESEÑA HISTÓRICA	40
2.1.2	OBJETIVOS DE LA TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA	44
2.1.3	SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	46
2.1.3.1	Elementos de un Sistema Óptico	47
2.1.4	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	50
2.1.5	CONCEPTOS	53
2.1.5.1	Fibra Óptica	53
2.1.5.1.1	Características de las Fibras Ópticas	55
2.1.5.1.2	Ventanas de Transmisión	58
2.1.5.2	Reflexión	59
2.1.5.3	Refracción	60
2.1.5.4	Índice de Refracción	61

2.1.5.5	Reflexión Total Interna (R.T.I).....	63
2.1.5.6	Apertura Numérica (AN).....	64
2.1.5.7	Grado de desplazamiento del Rayo Refractado	65
2.1.6	CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	66
2.1.6.1	Por la variación del Índice de Refracción	66
2.1.6.1.1	Fibra Óptica con Índice de Refracción Escalonado.	69
2.1.6.1.2	Fibra Óptica con Índice de Refracción Gradual.....	70
2.1.6.2	Por su Aplicación	71
2.1.6.2.1	Fibras de Alta Calidad	73
2.1.6.2.2	Fibras para Enlaces de corta y media distancia	74
2.1.7	FABRICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA	75
2.1.7.1	Métodos Directos	76
2.1.7.1.1	Método del Doble Crisol	76
2.1.7.1.2	Método del Alambre en el Tubo	77
2.1.7.2	Métodos de Deposición	79
2.1.7.2.1	Deposición química de vapor modificada (MCVD).	79
2.1.7.2.2	Deposición química de vapor con plasma modificada (PMCVD).....	80
2.1.7.2.3	Deposición de vapor exterior (OVD).....	81
2.1.7.2.3	Deposición de vapor axial (AVD).....	82
2.1.7.3	Secado y Enrollado de la fibra desde la Preforma	83
2.1.8	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN	84
2.1.8.1	Ventajas	84
2.1.8.1	Desventajas	88
2.2	PROPAGACIÓN DE LUZ EN FIBRAS ÓPTICAS	88
2.2.1	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	92
2.3	PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN	94
2.3.1	ATENUACIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA	94
2.3.1.1	Causa de Atenuación	95

2.3.2	DISPERSIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA	97
2.3.2.1	Tipos de Dispersión	98
2.3.3	ANCHO DE BANDA EN LAS FIBRAS ÓPTICAS	100
2.4	FUENTES Y DETECTORES ÓPTICOS	102
2.4.1	INTRODUCCIÓN	102
2.4.2	FUENTES ÓPTICAS	103
2.4.2.1	Diodos Led	104
2.4.2.1.1	Tipos de diodos Led	107
2.4.2.2	Diodos Láser	111
2.4.2.2.1	Tipos de diodos Láser.....	115
2.4.3	DETECTORES ÓPTICOS.....	120
2.4.3.1	Detectores PIN	124
2.4.3.2	Detectores APD	127
2.4.3.3	Ruido en Receptores Ópticos	134
2.5	MODULACIÓN Y MULTIPLEXACIÓN	137
2.5.1	MODULACIÓN.....	137
2.5.1.1	Modulación Óptica	138
2.5.1.2	Modulación de Intensidad (IM)	139
2.5.2	MÉTODOS DE DETECCIÓN	142
2.5.2.1	Detección Directa	142
2.5.2.1.1	Ventajas de la detección directa	143
2.5.2.2	Detección Coherente	143
2.5.2.2.1	Ventajas de la detección coherente	144
2.5.3	MULTIPLEXACIÓN	145
2.5.3.1	Jerarquía Digitales de Multiplexación	146
2.5.3.1.1	Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH)	146
2.5.3.1.2	Jerarquía Digital Sincrónica (SDH)	149

2.5.3.2	Multiplexación por división de longitud de onda	157
2.5.3.3	Método de selección del canal	162
2.5.3.4	Desempeño de un sistema FDM/WDM óptico	164
2.5.3.4.1	Penalidad del sistema	164
2.5.3.4.2	Probabilidad de error	167
2.5.3.5	Componentes de un sistema WDM	169
2.5.3.5.1	Fuentes Ópticas	169
2.5.3.5.2	Amplificadores/Repetidores Ópticos	172
2.5.3.5.3	Filtros Ópticos	174
2.5.3.5.4	Acopladores Ópticos	178
2.5.3.5.5	Multiplexores.....	179
2.5.3.5.6	Convertidores de longitud de onda	180
2.5.3.5.7	Conmutadores Ópticos	181
2.6	CONECTORES Y EMPALMES	183
2.6.1	EMPALMES	183
2.6.2	CONECTORES	187
2.6.2.1	Tipos de Conectores	188
2.7	EQUIPOS TERMINALES DE LÍNEA EN UN SISTEMA ÓPTICO	191
2.7.1	EQUIPO TRANSMISOR	192
2.7.1.1	Regenerador / Decodificador	193
2.7.1.2	Codificador de Línea	194
2.7.1.3	Transmisor Óptico	195
2.7.2	EQUIPO RECEPTOR	196
2.7.2.1	Receptor Óptico	197

CAPITULO III MODULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN. CRITERIOS DE DISEÑO DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA. CIRCUITOS PRÁCTICOS PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS.

3.1	INTRODUCCIÓN	198
3.1.1	BALANCE DE PÉRDIDAS Y POTENCIAS	200
3.2	CÁLCULO DE LA DISTANCIA ENTRE REGENERADORES	201

3.2.1	CRITERIO DE LA ATENUACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE	201
3.2.2	CRITERIO DE LA MÁXIMA DISPERSIÓN POR LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA	203
3.2.2.1	Máxima Dispersión en Fibras Multimodo	205
3.2.2.1.1	Máxima Dispersión en Fibras multimodo de índice escalonado	206
3.2.2.1.2	Máxima Dispersión en Fibras multimodo de índice gradual	206
3.2.2.2	Máxima Dispersión en Fibras Monomodo	207
3.3	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN ENLACE ÓPTICO	208
3.3.1	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES ÓPTICOS.....	209
3.3.1.1	Selección del Emisor Óptico	209
3.3.1.2	Selección de la Fibra Óptica	210
3.3.1.3	Selección del Detector Óptico	211
3.4	DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELEMENTAL A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA	213.
3.4.1	CRITERIOS DE DISEÑO DEL ENLACE ÓPTICO	214
3.4.1.1	Control de Parámetros: Atenuación y Ancho de banda	217
3.4.1.1.1	Control de Atenuación: Balance de Pérdidas y Potencias	218
3.4.1.1.2	Control del ancho de banda: Tiempos de Subida y Dispersión	221
3.4.2	ANÁLISIS GENERAL DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR	223
3.4.2.1	Circuito Transmisor	223
3.4.2.2	Circuito Receptor	227
3.4.3	MONTAJE DE TERMINALES ÓPTICOS	231

3.5	AYUDA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO DE UN ENLACE ÓPTICO Y DE CIRCUITOS OPTOELECTRÓNICOS PRÁCTICOS UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	233
3.5.1	MANUAL DEL USUARIO	233

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

RESUMEN

La necesidad de utilizar el computador como herramienta fundamental para el aprendizaje, ha hecho posible el desarrollo de aplicaciones del tipo tutorial que sirven como método de consulta para el estudiante, como es el caso del presente proyecto para la enseñanza de Comunicaciones Ópticas.

En el primer capítulo de éste trabajo se trata las consideraciones para la selección del software adecuado con el cual se desarrolla el programa computacional didáctico para la asignatura de Comunicaciones Ópticas, luego se menciona las características de funcionamiento y herramientas que dispone el paquete computacional elegido.

En el capítulo número dos se desarrolla el Módulo Teórico con información, conceptos básicos y gráficos de Comunicaciones Ópticas, el cual se tendrá a disposición del usuario en la aplicación multimedia desarrollada.

En el tercer capítulo se presenta el Módulo de Diseño y Simulación, en el cual se mencionan: los criterios para diseñar un enlace a través de fibra óptica, la selección de componentes ópticos adecuados de tal manera de que se cumplan ciertos requerimientos del sistema y los circuitos optoelectrónicos que se utilizan en un sistema óptico. Además en este capítulo se muestran algunas de las pantallas desarrolladas para el módulo de diseño y simulación, así como también el manual del usuario para la utilización del programa computacional.

PRESENTACIÓN

Actualmente el uso de la fibra óptica como medio de transmisión en el ámbito de las Telecomunicaciones está en su punto máximo, desarrollándose aplicaciones de comunicación a grandes velocidades de transmisión, con una buena calidad en la recepción de diversos tipos de señales por un cable de fibra.

Debido a que las comunicaciones ópticas utilizan elementos optoelectrónicos para la transmisión y recepción de señales, es necesario conocer los conceptos teóricos que describen las características de estos elementos, así como también es indispensable explicar el proceso que siguen las señales en un enlace mediante fibra óptica.

Aunque existen diversas formas de transmisión de señales, nos centraremos principalmente al estudio de la comunicación mediante fibra óptica.

Para que el estudiante tenga una herramienta didáctica, se explicará detalladamente los elementos y procesos que se tienen en las comunicaciones ópticas.

El planteamiento del presente Proyecto de Titulación, se basa fundamentalmente en la implementación de un programa computacional como ayuda para el estudio de las comunicaciones ópticas, por tanto es necesario que en el presente trabajo se trate sobre la elección, instalación, manejo, características y ventajas que presenta el programa seleccionado, haciendo una comparación entre diversos tipos de herramientas computacionales que se encuentran en el mercado.

CAPITULO I

ENFOQUE DE LA APLICACIÓN A IMPLEMENTAR MEDIANTE UN PROGRAMA COMPUTACIONAL

1.1 GENERALIDADES

El avance tecnológico en el software y hardware de computadores, ha permitido que este equipo sea utilizado en todos los campos de la industria, así como también en Instituciones Educativas en la enseñanza y formación de sus estudiantes, mediante la interacción con el computador se consigue hacer más dinámico el estudio y aprendizaje.

Actualmente una buena parte de la población mundial tiene alcance a un computador, y con mucha más razón un estudiante que para realizar un simple documento debe utilizar esta herramienta, por tanto el desarrollo del presente trabajo tiene como finalidad aprovechar las características de este equipo para crear una aplicación didáctica orientada a la enseñanza de las Comunicaciones Ópticas.

La aplicación desarrollada con un paquete computacional debe presentar en pantalla información relacionada con el tema, de una manera sencilla y didáctica al usuario final. En el mercado se dispone de una variedad de paquetes computacionales orientados al desarrollo de aplicaciones didácticas, y de tipo tutorial.

Para la elección del paquete computacional a usar se debe tomar en cuenta principalmente lo siguiente:

- Factor económico
- Características

La aplicación que será desarrollada, debe presentar la información necesaria y suficiente con opción a que el usuario pueda navegar fácilmente, además presentar características *multimedia*.¹

La multimedia es una tecnología que rápidamente se ha convertido en la elegida para presentar información de una manera interactiva, oportuna y entretenida. La utilización de sonido, imágenes y movimientos está haciendo que la distribución electrónica de la información esté más próxima a la comunicación humana.

El desarrollo de la aplicación multimedia, usando *hipermedia*² requiere de una sólida planificación, implementación y entrenamiento administrativo.

El software *hipermedia* hace posible que un usuario acceda y busque información en una aplicación de una manera no lineal, la interactividad es propiedad de este tipo de software.

La planeación y administración de proyectos informáticos que capacitan a los estudiantes para enfrentar los diferentes trabajos a ellos encomendados deben estar enfocados según el área donde se van a desenvolver profesionalmente.

Para esta aplicación se requiere que dicho paquete trabaje por lo menos con:

- ❖ Texto
- ❖ Gráficos estáticos o en movimiento
- ❖ Navegación³
- ❖ Hipertexto⁴

¹ Multimedia.- Término que se refiere a la combinación de tecnologías como: música, video, texto e imágenes controladas y mostradas por una computadora, para una presentación interactiva.

² Hipermedia.- es el software que hace posible que un usuario acceda y busque información de una manera no lineal en una aplicación multimedia.

³ Navegación es la posibilidad que tiene el usuario para buscar información en la aplicación utilizando enlaces internos entre páginas, mediante una acción, por ejemplo clic con el mouse.

⁴ Hipertexto.- Es la manera de presentar la información al usuario final. Son datos que contienen enlaces (links) con otros datos. Cuando visualizamos un documento hipertexto en la pantalla del ordenador, se nos muestra una página de información normal pero donde algunos elementos del documento están resaltados.

Por tanto el paquete que utilicemos debe trabajar en forma integral con las características antes mencionadas, por ende debe manejar: editor de texto, editor de gráficos así como posibilitar enlaces (links) entre páginas.

El editor de texto debe permitir la inclusión de algunas fórmulas matemáticas que se utilizan en el desarrollo de circuitos optoelectrónicos y de enlaces de comunicación mediante fibra óptica.

En general desarrollo del presente proyecto puede plantearse en dos grandes módulos:

1. **Módulo Teórico:** en este módulo se tratará la parte teórica, como conceptos básicos de comunicaciones ópticas y las propiedades que presenta el paquete computacional elegido, incluyendo gráficos, animaciones, hipertexto, expresiones matemáticas, etc.
2. **Módulo de Diseño y Simulación:** en este módulo se podrá realizar el diseño de un enlace mediante fibra óptica, permitiendo el ingreso de datos, la obtención de resultados. También se describe, los criterios de diseño de circuitos y enlaces, así como la simulación de los mismos, obteniendo señales de salida gráficas.

1.1.1 CONSIDERACIONES PARA LA ELECCIÓN DEL SOFTWARE A SER UTILIZADO EN EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.

Como el objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo de una aplicación multimedia, requerimos de un paquete computacional que presente las características ya indicadas.

En el mercado existe un sinnúmero de paquetes computacionales o software, para el desarrollo de este tipo de aplicaciones multimedia, los paquetes más utilizados debido a sus facilidades y características son:

Multimedia Toolbook

Esta es una excelente herramienta que usa como metáfora un libro, lo que permite incorporar objetos gráficos, campos, páginas, botones y fondos. La creación del libro se realiza mediante la ubicación de botones, gráficos o cualquier objeto en un lugar de la página y operar detrás de él con un Open Script⁵.

IconAuthor

A diferencia de Toolbook, esta herramienta no incluye lenguajes de programación, en vez de eso trabaja a base de una estructura de iconos los cuales dirigen el camino de la interfaz. Esta herramienta está dirigida a las personas sin conocimientos de programación ya que se puede hacer bastante menos que con otras herramientas, pero el uso de las ventajas del IconAuthor es bastante sencillo.

Macromedia's Director

Trabaja con la metáfora de una película, la cual consiste en un escenario, miembros (gráficos, animaciones, vídeo, texto y sonido). Director usa un lenguaje de scripts llamado Lingo. Este script puede ir asociado a cada objeto usado en la escena lo cual permite darle infinidad de atributos y modificarlos en tiempo real.

Visual Basic

Es un paquete que es usado más como lenguaje de programación y no está orientado a desarrollar aplicaciones multimedia debido a que el manejo de texto, gráficos y sonido no es tan fácil como con otros paquetes.

Cada una de estas cuatro posibilidades presentan sus características y facilidades, pero Visual Basic y Multimedia Toolbook se encuentran fácilmente en

⁵ Este término se mencionará más adelante

el mercado nacional ya que son los mayormente utilizados. Entonces el factor económico para la adquisición de cualquiera de estos dos paquetes computacionales se reduce al mínimo.

Pero como se mencionó anteriormente Visual Basic es una herramienta computacional con un alto grado de lenguaje de programación y se dificulta en el manejo de gráficos, texto, sonido, etc.

En cambio Multimedia Toolbook es una herramienta que presenta una mejor facilidad en el manejo de elementos multimedia y un menor grado de complejidad al momento de realizar la programación. Esta herramienta se volvió la más poderosa y elegante para desarrollar aplicaciones multimedia, su principal defecto es que está disponible únicamente para ambiente Windows, pero la mayoría de aplicaciones de este tipo se encuentran desarrolladas para trabajar bajo Windows.

Con todas las consideraciones mencionadas se puede elegir a Multimedia Toolbook como la herramienta mas adecuada para desarrollar la aplicación en el presente trabajo, a continuación se menciona las características que presenta el programa computacional escogido, así como las condiciones mínimas que debe presentar el hardware del computador.

1.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE

Para el desarrollo del presente trabajo, se utiliza Toolbook 1.51, aunque actualmente existe la versión 8 de éste paquete con características más avanzadas, pero la versión 1.51 presenta elementos necesarios y suficientes para trabajar en la presente aplicación.

Para trabajar con Multimedia Toolbook 1.51, se requiere de un computador personal con las siguientes características mínimas:

- Procesador 386 o superior

- Memoria RAM de 4Mb
- Mínimo despliegue de 256 colores y un área de pantalla de 640x480 píxeles
- Tarjeta de sonido de 16 bits o superior
- Tarjeta de captura de video
- Espacio libre de disco duro: 5 Mbytes mínimo
- Windows 3.1 o mayor
- Paquete dibujante
- Paquete pintor
- Una copia de Toolbook 1.51

1.1.3 INTRODUCCIÓN A MULTIMEDIA TOOLBOOK

1.1.3.1 El Término Multimedia

La multimedia significa disponer de dos o más medios convencionales de las tecnologías de comunicación como por ejemplo: texto, imágenes fijas o en movimiento, los sonidos que pueden ser registros de voz humana o fragmentos de música.

EQUIPO NECESARIO

Hace poco se ha generalizado la abreviatura MPC, las Computadoras Personales Multimedia que son muy potentes y se debe entender las dos plataformas más notables para producir y distribuir proyectos de multimedia: la computadora Macintosh, Apple y cualquier computadora IBM-PC o compatible, con microprocesadores Intel 386 o superiores y que ejecute Windows de Microsoft.

CREATIVIDAD

Antes de comenzar un proyecto de multimedia, se debe establecer su alcance y contenido, hay que dejar que el proyecto a desarrollarse tome forma en su cabeza mientras se piensa en todos los métodos disponibles para llevar mensajes a los espectadores que son los usuarios.

ORGANIZACIÓN

Es esencial que se desarrolle un índice organizado y un plan que sea racional en términos de habilidades, tiempo, presupuesto, herramientas y recursos que están a la mano. Debe estar listo antes de empezar y generar gráficos, sonidos y otros componentes los cuales deben monitorearse durante la ejecución del proyecto.

En la actualidad los sistemas multimedios disponen de algunos elementos como:

AUDIO

Es uno de los principales componentes de los equipos multimedios, dispone de registros de voz claros, la posibilidad de reproducir los fragmentos musicales con la calidad de incorporar todo tipo de efectos sonoros especiales creíbles que refuerzan un mensaje que se desea transmitir. La importancia del audio en el sistema multimedia se puede dar con la diferencia entre una película muda y otra en la cual el sonido se reproduce mediante el sistema SENSOROUND, en el primer caso debemos imaginar los sonidos que acompañan a la acción y la segunda el sonido aumenta y se puede escuchar en las imágenes proyectadas. Ejemplo: Se puede hablar de 2 formatos de sonido que son WAV y MIDI. Un WAV

es una grabación digital de sonido y un MIDÍ es la representación musical de un sonido.

IMAGEN

Las imágenes predominan en la transmisión de mensajes, se debe disponer de un sistema apropiado para reproducirlos. En el sistema multimedia se intenta que las imágenes reproducidas tengan la calidad necesaria para que se asemeje a la realidad.

Las imágenes incluyen diversos tipos de gráficos como fotografías digitalizadas o dibujos y esquemas de formato de mapas de bits o vectoriales.

TEXTOS

Aquí el texto cumple dos funciones:

- 1.- Articula la información transmitida y permite ofrecerla en forma más detallada
- 2.- Es el vehículo que permite manejar la aplicación.

Los textos aunque breves forman parte de los menús que despliegan las posibilidades de la aplicación.

Entre las opciones más interesantes se destacan las capacidades de hipertexto el cual permite a los usuarios ampliar la información contenida en el texto estableciendo criterios de selección ajustándose a la búsqueda, el hipertexto es una opción esencial en las obras de consulta ya que se accede a esta de forma rápida y flexible.

ANIMACIÓN

La incorporación de animaciones para explicar fenómenos, leyes, principios o procesos cuya fonalización mediante texto sería incomprensible justifica la incorporación en las aplicaciones multimedia.

VIDEO INTERACTIVO

Dentro de las aplicaciones multimedia no se puede prescindir de las imágenes en movimiento para que se pueda apreciar de mejor manera todas las bondades que este nos presenta. El video puede ser creado y editado. Se puede editar películas personales con transiciones y efectos. El video también se emplea en los juegos, simulaciones y comunicaciones.

SOPORTES MULTIMEDIA

La aparición de la multimedia es posible solo gracias a la utilización de nuevos soportes entre los cuales se destaca el CD ROM, que en el formato compact disk CD, se utiliza para el registro de sonido destinado en su reproducción en las cadenas de alta fidelidad, la información esta grabada en formato digital. Esto permite almacenar grandes cantidades de información (más de 750 Mbytes) en forma de datos, sonidos, imágenes de video y animaciones. La lectura se realiza directamente en el disco con la ayuda de un haz de rayos láser, al instalar una aplicación multimedia contenida en un CD ROM, el programa de instalación genera un icono que lo identifica y permite acceder a ella con rapidez y seguridad.

OTRO FORMATO MULTIMEDIA

El CD ROM es el formato multimedia más extendido pero existe otros tales como el CDI (compact disk interactive). El disco compacto interactivo es una mezcla entre el disco de audio convencional y el sistema de video VHS.

El CDI se orienta en la actualidad hacia aplicaciones en el mundo de los juegos y en el campo de la informática de consumo doméstico.

1.1.3.1.1 Ventajas de la Multimedia

- Con la aparición de la multimedia (MPC), los fabricantes del software han podido desarrollar sus programas sin preocuparse de la tarjeta de sonido, del lector CD ROM o del adaptador de gráficos que el computador tiene.
- En las computadoras que se instala el CD ROM se puede acceder a diversas enciclopedias de información variada que se presenta con imágenes y sonido.
- El usuario a la vez que realiza su trabajo puede escuchar música.
- Ofrece una mayor capacidad de interactuar con el sistema.

1.1.3.1.2 Desventajas de la Multimedia

- La dificultad de manejar imágenes de video desde el PC.
- El MPC especifica normas para los gráficos, el sonido, los lectores de CD-ROM, pero no incluye ninguna facilidad para el video en movimiento.
- Los críticos de multimedios han citado la falta de aplicaciones prácticas como un factor que impide el avance del medio.
- Quizás su mayor desventaja sea su alto costo.

1.1.3.2 Multimedia Toolbook

Multimedia Toolbook⁶ es una herramienta de desarrollo de aplicaciones multimedia basadas en un lenguaje orientado a objetos llamado OpenScript, desarrollado en 1985 por una compañía norteamericana llamada Asymetrix que dirige Paul Allen, quien fue cofundador con Bill Gates de la empresa Microsoft.

Para una mejor comprensión podemos decir que Toolbook interpreta que una aplicación multimedia creada es un libro (book) y cada una de sus posibles pantallas, que contienen información, son las páginas (page) de ese libro.

Además, Toolbook nos permite asignar un mismo fondo (background) de la aplicación con una misma imagen, color o conjunto de objetos para optimizar los recursos de la aplicación y del sistema. Por ejemplo, es muy útil poner en el fondo de las páginas del libro el botón salir, ayuda, volver al inicio, etc.

Un libro en Toolbook viene a ser como un archivador con fichas, como por ejemplo, el fichero de empleado de una empresa. Al conjunto de las fichas se le denomina libro, y cada ficha en particular, página; cada página contiene información relativa a un empleado, el total de páginas comparten un fondo común denominado *background*, en él se colocan aquellos objetos que compartirán todas las fichas.

Antes de hablar de sus elementos, es conveniente comentar que hay dos formas de trabajar con Toolbook, el nivel autor (Author level) es el que nos permite diseñar y modificar la aplicación multimedia y el nivel lector (Reader level) que es donde se ejecuta la misma. Para pasar de un nivel a otro podemos pulsar la tecla de función F3 o bien ir al menú Edit y pulsar Reader.

Cuando entramos en este software aparecerá en la pantalla del ordenador la ventana de la **figura 1.1**, donde vemos los siguientes elementos:

⁶ Cabe indicar que la versión de Toolbook usada en la presente Tesis de Grado, es en Inglés, es decir todos los comandos, menús y otras características que presenta están en este idioma. Por tanto se tendrá términos en Inglés descritos en el presente trabajo.

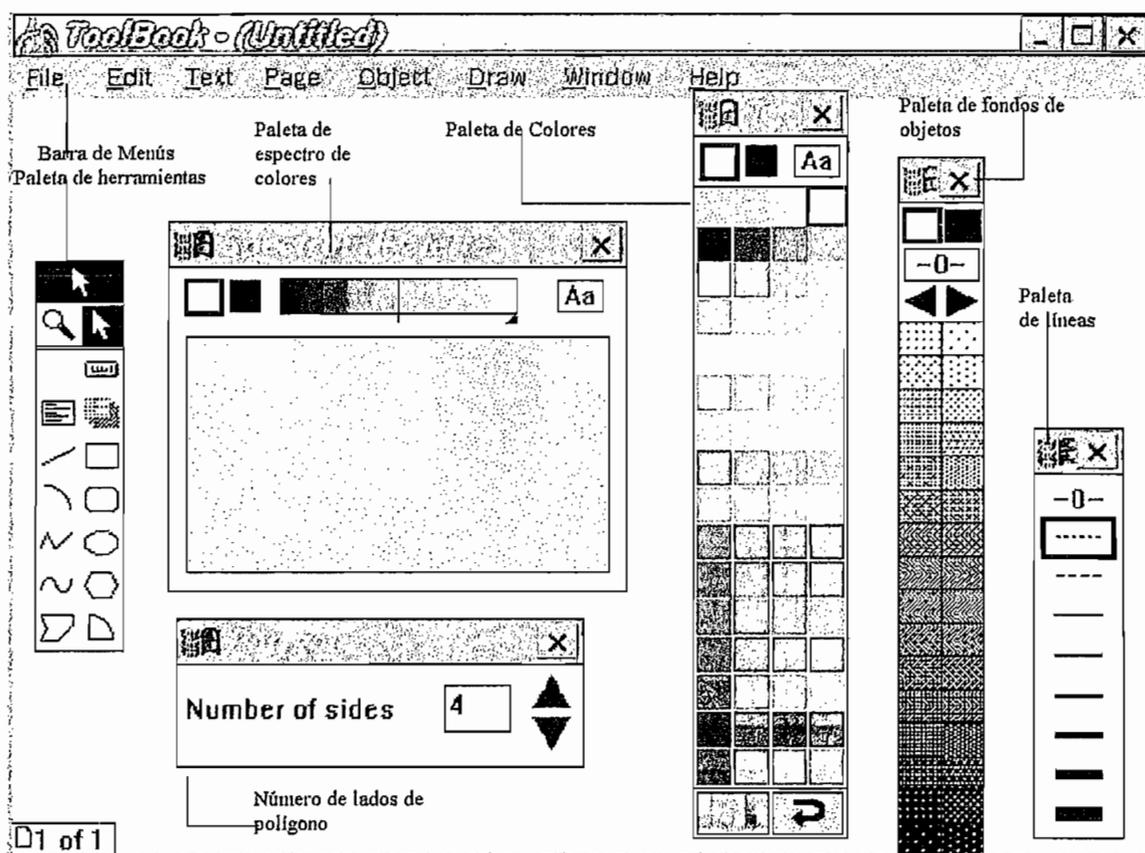


Figura 1.1. Pantalla inicial de Toolbook

La barra de menús, situada en la parte superior con las opciones de menú File: abrir, guardar, imprimir un fichero, ejecutar la aplicación, salir del programa entre otras. La opción Edit, donde se encuentra las utilidades de edición, copiar, cortar, pegar, pasar del modo lector a modo autor y viceversa. La opción de menú Text donde definimos las propiedades relativas al tipo de letra, insertar gráficos, estilo de párrafo y crear palabras sensibles (hotwords), es decir, que al pasar con el cursor por ellas éste cambia en forma de mano u otro icono permitiéndonos navegar a través de la aplicación. El menú Page para navegar entre páginas de nuestra aplicación, además para pasar del fondo (background) al frente (foreground) . El menú Object para establecer las propiedades de nuestros objetos, del fondo, de la página, así como la creación de nuevas páginas, nuevos fondos y visores. Con el menú Draw podemos establecer el modo en el que se muestran los objetos en pantalla. El Menú Window muestra las paletas de línea, de colores, de polígono, también el tamaño de la página. Y el menú Help que nos muestra ayuda relativa al manejo de este software.

Con la ayuda de la paleta de herramientas situada, generalmente en la parte izquierda de la pantalla, podemos construir el tipo de objeto que representa, excepto el cursor de selección y el zoom (forma de lupa) que son herramientas para el diseño.

La barra de estado situada en la parte inferior izquierda, es de carácter informativo proporcionando información sobre lo que sucede en pantalla, como el indicador de número de página, saber en qué nivel estamos (fondo/background o en el frente/foreground).

Al crear una aplicación con Toolbook nos encontraremos generalmente con un libro vacío en modo autor.

Cada vez que se ejecuta Toolbook, se crea automáticamente una nueva aplicación y presenta una página vacía en pantalla; si abrimos un libro (aplicación) existente, ToolBook siempre se sitúa en la primera página del libro.

Siempre es conveniente que las diferentes páginas que formen nuestra aplicación multimedia no estén saturadas de información, llenas de botones, o inundadas de colores llamativos. Éstas deberían diseñarse de forma consistente e intuitiva para el usuario. En este sentido sería interesante, para facilitar la navegación, situar los botones de uso más frecuente en la misma posición, además de situar siempre en el fondo/background los objetos que sean compartidos por varias páginas.

1.1.3.3 Conceptos Básicos

Los objetos (Objects): Un objeto es cualquier elemento de Toolbook, desde el propio archivo global hasta las páginas y los elementos sencillos que en ella se encuentran. Cada uno de estos elementos, aun perteneciendo a una clase determinada (página, menú, etc.), tiene unas características que le confieren identidad propia. Cada objeto es diferente de los demás, no sólo por tener distinto color o distinto tamaño, sino porque cada uno de ellos tiene un código asociado a él, así por ejemplo, a dos botones exactamente iguales podemos asociarles los

códigos de avance y retroceso de pagina, respectivamente, lo que los convierte en un objeto con entidad propia, que no necesita de los demás para ejercer su misión. Es esta orientación a objeto la que hace de ToolBook una herramienta especialmente potente para el desarrollo de aplicaciones multimedia.

Toolbook tiene diferentes tipos de objetos, como son:

- ❖ Books (libros)
- ❖ Backgrounds (fondo)
- ❖ Pages (páginas)
- ❖ Buttons (botones)
- ❖ Fields (campos)
- ❖ Record Fields (campos de registro)
- ❖ Hotwords (palabras sensibles)
- ❖ Groups (grupos)
- ❖ Graphic objects (objetos dibujados, objetos pintados, etc)

El Libro (Book): programa creado con Toolbook. En el concepto de libro se incluyen todos sus componentes como páginas, gráficos, animaciones, enlaces, etc. Libro es sinónimo también de fichero. Un libro consta de un número de páginas.

La página (Page): Es el lugar donde irán los objetos que componen la aplicación. La progresión de varias páginas enlazadas constituye el libro o aplicación. Así mismo, cada página se compone del frente (foreground) y el fondo (background).

Frente (Foreground): En el frente de la página se coloca todo elemento que es específico de cada una de ellas. Es decir los objetos que se coloquen en el foreground son únicos de la página utilizada.

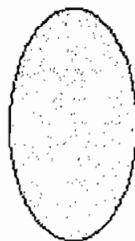
Fondo (Background): en el fondo de la página se coloca todo elemento que es común a aquellas páginas que lo comparten para no repetirlo en cada página, como un gráfico, un botón de navegación, un texto, etc.

Identificador de Objetos: En la escritura de scripts, a menudo hay que referirse a los objetos para que puedan realizar alguna acción especificada en el Script, como por ejemplo el esconder y mostrar el objeto, o para cambiarlo de alguna manera.

Para diferenciar los diversos objetos que se tienen en Toolbook, se lo hace por la forma misma del objeto (ej:botones, campos, etc) y el *Nombre del Objeto (Object's name)* o *ID (Identifiers)*.

Si el objeto no está en la página actual, se debe adicionar información para identificarlo.

Por ejemplo para referirse a una elipse de color verde en una página se le puede denominar así:



ellipse "oval" o elipse ID0

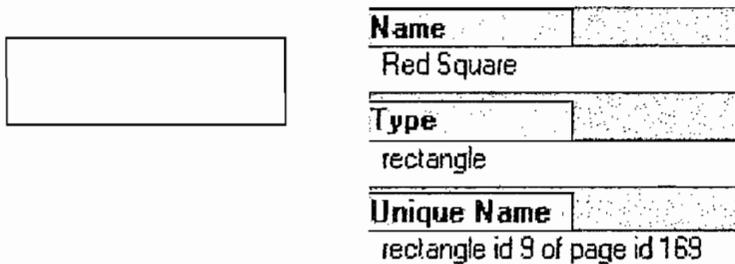
Si queremos referirnos a un botón en el background, se podría usar la siguiente información:

Button "Pagina siguiente" de Background "Indice"

Nombre o ID: Se puede referir a un objeto usando su nombre, si este tiene uno o también su ID. Se puede nombrar un objeto usando el *Cuadro de dialogo de propiedades*, que se halla en el Object Menu. El ID es asignado por Toolbook y es único para cada objeto.

Usualmente es mejor para referirse a un objeto mediante su nombre. Cuando se corta y pega un objeto, su ID cambia, mientras que el Name no varía a menos que se lo cambie.

El UniqueName (Nombre Unico): El UniqueName de un objeto identifica al mismo, este incluye el ID del objeto. El siguiente ejemplo muestra el Nombre, Tipo de objeto y el UniqueName de un Rectángulo dibujado.



En la figura 1.2 se indica la estructura de una aplicación de Toolbook, así como la de un libro (book).

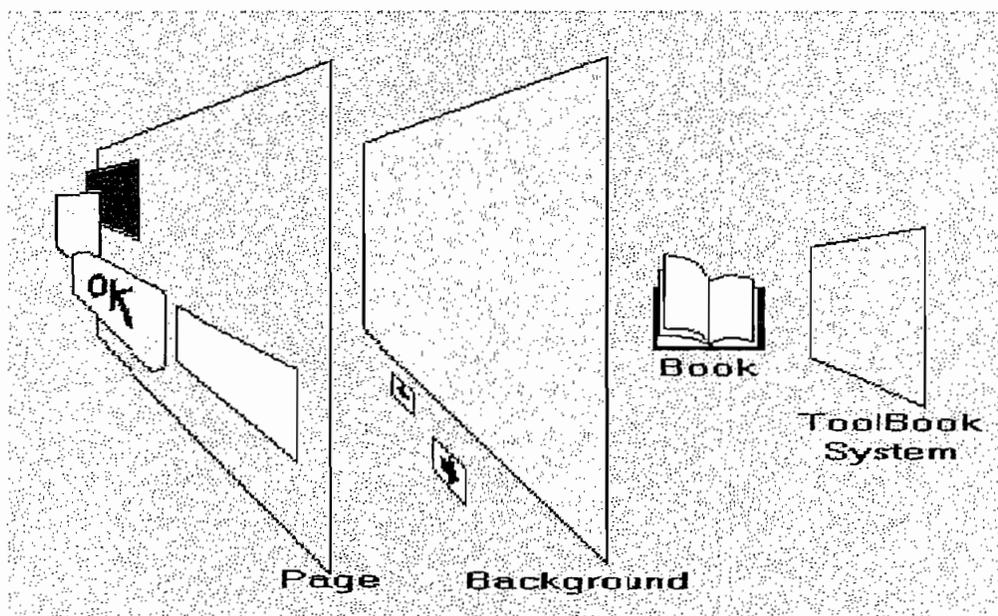


Figura 1.2. Estructura de una aplicación y de un libro en Toolbook

Nivel Autor y Lector

ToolBook ofrece dos modos distintos para entrar en una la aplicación: el modo autor y el modo lector. En uno se programa y en el otro se ejecuta la aplicación.

El modo autor es el que aparece siempre que se entra en el programa ToolBook. Aquí es donde aparecen todos los menús de herramientas, se pueden modificar los elementos de cada pantalla y editar el código. En este modo la aplicación no se ejecuta.

El paso de modo autor a lector es a través de la barra de menús o simplemente con la tecla F3. En el modo lector la aplicación se presenta tal y como quedaría en su ejecución final. Desaparecen, pues la ventana principal y los menús de herramientas. No se puede modificar ningún elemento ni característica de la aplicación, ya que el código sé esta ejecutando. Como este modo es el que cualquier usuario ejecutaría la aplicación, el programa permite bloquear el acceso al modo autor mediante una contraseña (password), quedando así a salvo tanto el código como los diversos elementos de la aplicación generada de una posible intromisión.

OpenScript: es el lenguaje de programación de Toolbook de alto nivel. Esto significa que la estructura de sus sentencias y comandos es muy parecida al lenguaje humano. Se trata de un lenguaje cuyas expresiones son muy largas, asemejando la estructura de una frase de lenguaje corriente, y los comandos son tan obvios como "to handle.." (Mas o menos significaría " que hacer cuando..."), que es el comando más utilizado. La estructura de este comando es:

```
to handle ButtonUp      ; Al realizar un click con el mouse, sobre un botón, se
                        ; indica que el programa vaya a la página 35 del libro.
go page 35
.
.
.      Otros comandos
.
.
end
```

Esta sentencia en concreto señala a ToolBook que hacer cuando se pulsa un botón, por ejemplo ir a la página indicada. Se habrá advertido que la forma de introducir comentarios es con el guión "—", de tal forma que esto hace que el compilador no interprete estas líneas.

Script (Escrito): es el programa realizado en el lenguaje de Toolbook que maneja la actuación de cualquier objeto. El código de lenguaje se encuentra en los "scripts" (literalmente guiones cinematográficos), una de las cualidades propias de los objetos es que se pueden editar y modificar de forma rápida y sencilla. Estos "scripts" se almacenan en el mismo archivo de la aplicación (de extensión "TBK") evitando así la multiplicación innecesaria de archivos en el disco.

El tipo de sentencias que se originan puede llegar a ser, obviamente bastante complejas, dependiendo de la cantidad de acciones que ToolBook deba realizar, pero en todo caso las expresiones son muy sencillas, y la posibilidad de incluir

comentarios ayuda mucho al entendimiento del código, sobre todo si este se realiza por distintos programadores o debe ser posteriormente revisado.

Messages (Mensajes): Una acción de usuario, como es el hacer un click a un botón mediante el mouse, causa mensajes a ser enviados. Cada mensaje posee un nombre. Para una mejor explicación de estos mensajes, tomemos como ejemplo el realizar un click o presionar un objeto con el mouse (ratón), esta acción provoca dos mensajes a ser enviados al objeto: *buttonDown* (botón abajo) y *buttonUp* (botón arriba).

Numerosos mensajes son enviados a un objeto como resultado de acciones y movimientos del mouse⁷. Estos mensajes son:

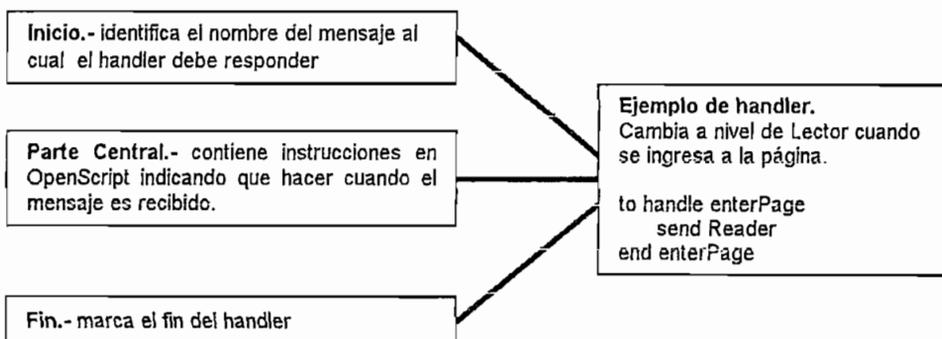
mouseEnter	mouseLeave
buttonDown	buttonUp
buttonStillDown	rightButtonDown
buttonDoubleClick	rightButtonUp
rightButtonDoubleClick	

Handlers (Manejadores): son una serie de declaraciones OpenScript que describen la contestación a un evento particular tal como el realizar un click con el mouse a un objeto. Un script puede contener más de un handler, cada uno respondiendo a un evento diferente.

Cuando un objeto recibe un mensaje enviado por la acción del usuario, éste puede responder a dicho mensaje o ignorarlo, si el mensaje es ignorado, dicho mensaje no se queda en el objeto, sino que pasa al grupo, página, background o

⁷ Estos mensajes no son enviados cuando nos encontramos en el Nivel de Autor.

libro que contiene al objeto. Para que un objeto pueda responder a un mensaje, dicho objeto debe tener un handler para el mensaje correspondiente en su script. La estructura de un handler consta de:



Cuando un mensaje es enviado a un objeto, este viaja a través de la *jerarquía de objetos*, hasta que éste localiza un handler para responder a dicho mensaje, sino encuentra el handler sigue el camino en función de la jerarquía específica de este programa, hasta que retorna al sistema Toolbook, este proceso descrito se indica en la figura 1.3.

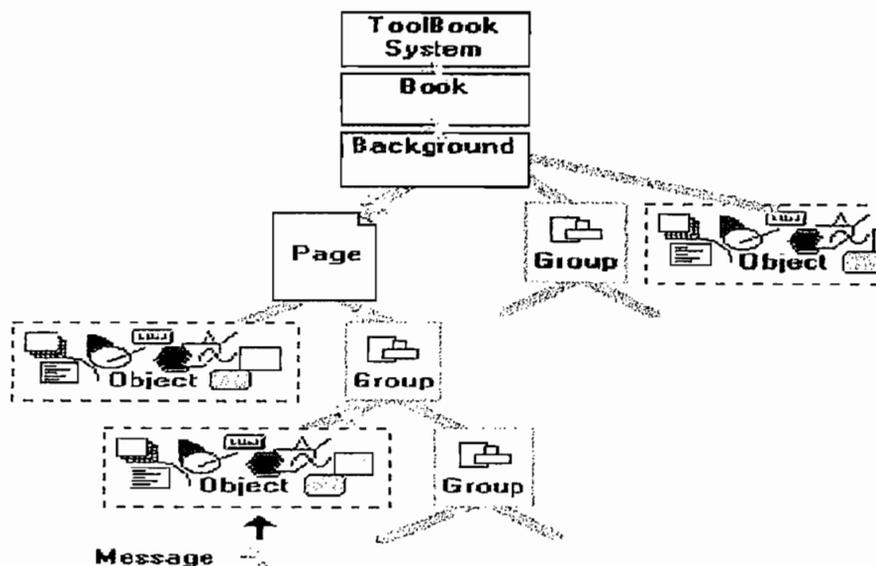


Figura 1.3 Jerarquía de objetos por la cual avanza un mensaje en Toolbook

1.2 INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO TEÓRICO.

Para que el programa computacional desarrollado sea una herramienta didáctica para el estudio de las Comunicaciones Ópticas, se trata de manejar la mayor cantidad de información posible del tema relacionado, así como también se incluyen gran cantidad de gráficos para los tópicos planteados y para que sea interactivo el programa con el usuario, se dispone de libros, páginas, backgrounds, como si se tratara de un cuaderno.

Se incluyen además en las páginas los botones de navegación, hipertexto, ecuaciones matemáticas, animación, etc.

En cada una de las páginas se provee de botones que permiten ir hacia delante y hacia atrás del libro ó regresar a la página principal de este, el cual llevará el nombre de COMUNICACIONES ÓPTICAS (Archivo OPTICA.TBK).

El tutorial computacional desarrollado con Multimedia Toolbook, está dividido en ocho partes como se indica en la figura 1.4.

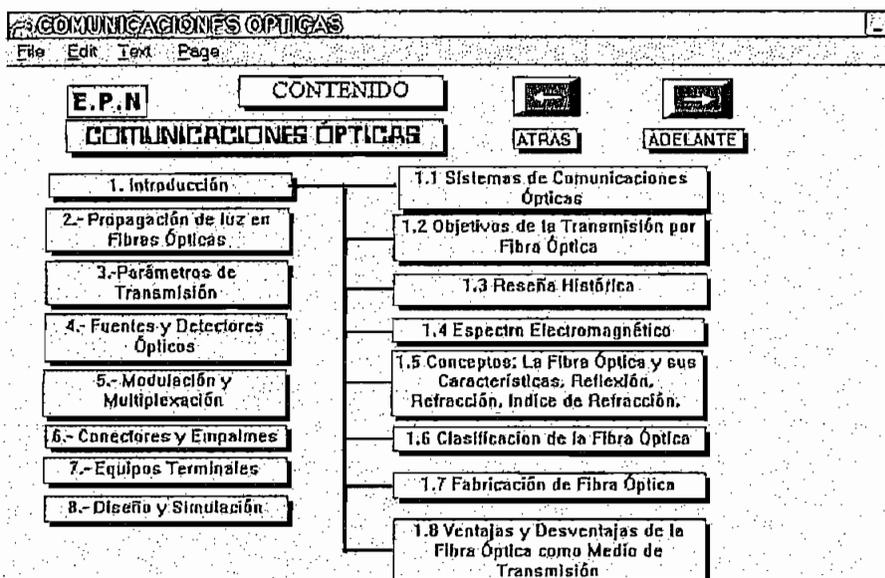


Figura 1.4. Pantalla del Contenido general del tutorial desarrollado en Toolbook

En el desarrollo del Módulo Teórico de este trabajo, se utiliza principalmente las *páginas (pages)* y *fondos (backgrounds)*, y para navegar por cada una de las páginas desarrolladas utilizamos los botones de navegación y hotwords (palabras sensibles). Estos últimos tienen aplicaciones adicionales, como se detalla más adelante.

1.2.1 BOTONES DE NAVEGACIÓN

Un botón es un objeto creado en una página de Toolbook con la herramienta de crear botones (button tool), que se encuentra en la paleta de herramientas en el nivel de autor.

Para que un botón actúe como un navegador de páginas dentro de un libro, se utiliza el handler **GO TO PAGE** (Ir a la página), y éste responderá al mensaje especificado. Dicho mensaje se genera al realizar un click en el botón diseñado.

Multimedia Toolbook nos da la facilidad de incluir en nuestras páginas, diferentes modelos de botones, como se indican a continuación (figura 1.5):

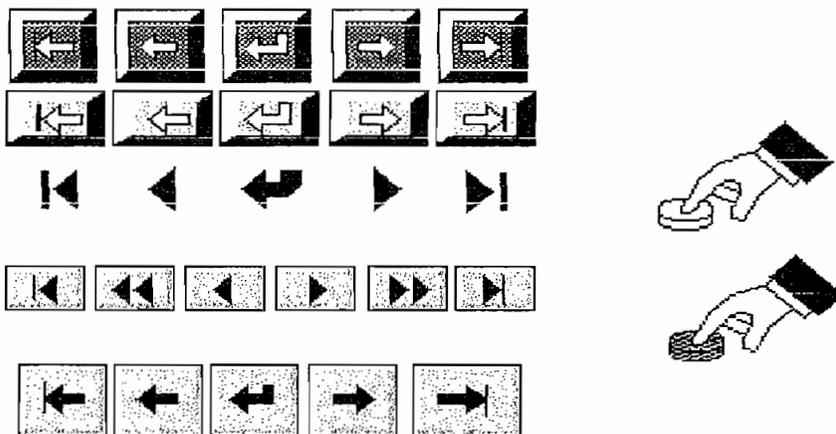


Figura 1.5 Tipos de Botones en Toolbook

1.2.2 ASIGNACIÓN DE CONTRASEÑAS (PASSWORD)

El Autor, puede limitar la habilidad de un Lector para realizar cambios en el trabajo realizado o incluso el uso de un libro, mediante la inclusión de passwords.

Un libro puede tener tres diferentes passwords, que son: para controlar el cambio de nivel de lector a nivel de autor, para abrir un libro, y para guardar el libro.

Un Autor asigna contraseñas en el Cuadro de diálogo para passwords, ubicado en Book Properties en Object Menu.

1.2.3 BOTONES CON TEXTO DE AYUDA

Los botones son creados con la paleta de herramientas de Toolbook y para lograr que estos objetos tengan texto de ayuda para la navegación en el libro creado, se usa el handler (manejador) denominado **REQUEST** (Solicitar), el cual responderá al mensaje especificado en el mismo.

Un ejemplo de este tipo, se muestra en la siguiente ilustración (figura 1.6) :

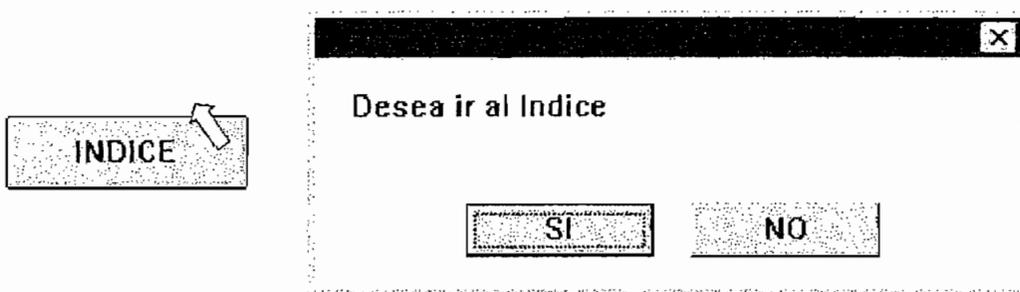


Figura 1.6. Botón con Texto de Ayuda

En el ejemplo anterior, tenemos creado el botón llamado INDICE, si realizamos un click sobre él, se despliega el cuadro con el texto de ayuda, seleccionamos una de las opciones y el handler responderá al mensaje escrito.

1.2.4 ESCRITURA DE TEXTO EN PÁGINAS

Para tener texto en las páginas creadas de un libro, se utiliza el objeto denominado FIELD (Campo). Estos objetos son áreas definidas creadas en el Nivel de Autor tanto en el Foreground (frente de página) como en el Background (fondo), en las cuales se puede escribir, leer y dar formato a un texto. En un campo se puede escribir hasta 32000 caracteres.

Otro tipo de objeto usado para texto es el RECORD FIELD (Campo de Registro), a diferencia del anterior, éste puede ser creado sólo en el Background, el cual es utilizado para que el usuario pueda escribir un texto diferente en las páginas que contengan Record Fields.

1.2.5 HOTWORDS (PALABRAS SENSIBLES)

La forma más clásica de generar enlaces entre paginas, como hemos visto están dadas por los botones. Sin embargo cualquier usuario de multimedia o navegante de internet, conoce las palabras que de un color determinado (generalmente azul) al hacer click sobre ellas funcionan como un botón. En toolbook este tipo de palabras se denominan hotwords (palabra caliente o palabra sensible) e implican palabras o frases que al pasar sobre ellas el cursor se convierte en un "rectángulo" y funcionan como botones.

Un hotword es una frase o parte de texto en un campo (field) que tiene un Script e ID. En el nivel de lector, el puntero del mouse cambia a un rectángulo cuando se ubica sobre un hotword en un campo activado.

En la **figura 1.7** observamos un ejemplo de los hotwords, en el cual se ha creado el hotword en la frase *ancho de banda* y se implementa un enlace con otra página la cual tenga información acerca de este tema, y mediante un clic en la palabra encerrada en el rectángulo podemos interactuar con la información solicitada.

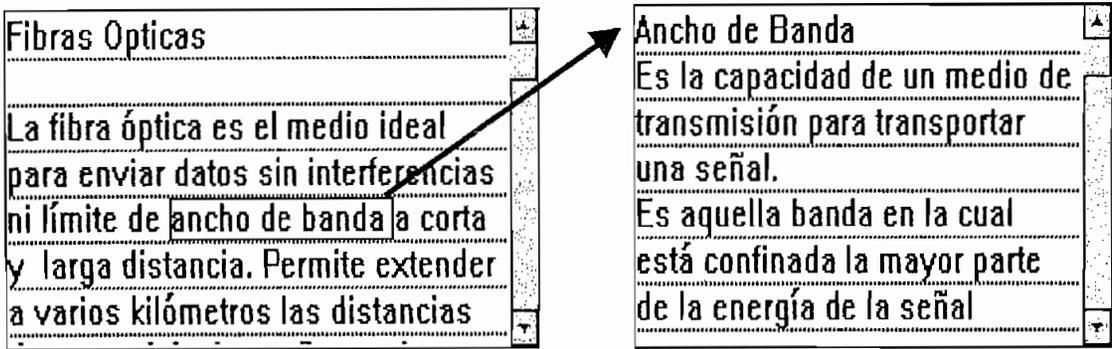


Figura 1.7 Inclusión de Hotwords en las páginas

1.2.6 INCLUSIÓN DE GRÁFICOS EN EL LIBRO

Para generar gráficos en nuestro libro, se utiliza la paleta de herramientas de Toolbook. Además se puede usar una aplicación de Windows que cree una pintura (paint graphic).

Para crear un objeto pintado (paint object), se puede copiar una imagen de pintura⁸ (paint image) desde otra aplicación en el Clipboard⁹ (Portapapeles), luego se pega la imagen en Toolbook. Toolbook automáticamente crea un objeto pintado (paint object) de la imagen de pintura (paint image) en el Clipboard.

En Toolbook se puede tener tres tipos de objetos gráficos, dependiendo de cómo se cree la imagen gráfica, y estos son:

- **Draw Object (Objeto de dibujo):** es un gráfico dibujado, creado con la paleta de herramientas de Toolbook. Pueden ser: arcos, líneas que formen ángulos, curvas, elipse, polígonos irregulares, etc.

⁸ Un paint image es también llamado un bitmap o un grupo de píxeles, puede ser una imagen escaneada o una imagen creada en un programa Paint.

⁹ Es el lugar de almacenamiento donde una aplicación de Windows guarda temporalmente el último artículo que fue copiado o pegado.

- **Picture Object (Cuadro):** es un objeto importado usando el comando *Import Graphic* del Menú File. Estos pueden moverse y cambiar su tamaño en Toolbook, pueden tener color, pero no es posible cambiarlo y no es posible editar un cuadro en Toolbook.
- **Paint Object (Objeto de pintura):** es creado pegando un bitmap desde el Clipboard en una página de Toolbook o importando un bitmap usando el comando *Import Graphic* del Menú File, el bitmap es colocado en Toolbook como un paint object. Un Paint Object puede tener un script y se almacena como un archivo bitmap o grupo de pixeles que forman la imagen. No es posible cambiar el tamaño de la imagen.

1.2.6.1 Importando Gráficos

Para importar un gráfico se usa el comando *Import Graphic* del Menú File de Toolbook, en el cual corre el *import filter* (filtro para importar) para transformar los archivos gráficos importados a un bitmap, creando así un picture object o un paint object.

Los estándares de formatos gráficos (Tabla 1.1) soportados por Toolbook son:

Extensión del Archivo Gráfico	Fuente del Archivo	Objeto representado en Toolbook
.bmp	Bitmap	Paint Object
.wmf	Windows Metafile	Picture Object
.dib	Device Independent Bitmap	Paint Object

Tabla 1.1 Formatos gráficos soportados por Toolbook.

1.2.6.2 Inclusión de Ecuaciones Matemáticas

Las ecuaciones matemáticas pueden crearse en un editor de ecuaciones que puede ser el de Microsoft Word, las cuales serán copiadas y pegadas en las páginas del libro creado.

Estas ecuaciones en Toolbook son consideradas como Picture Object (Cuadro), más no como texto, debido a que no fueron escritas dentro de un Field (Campo).

1.2.7 ANIMACIÓN DE OBJETOS

La animación en el libro desarrollado, es parte fundamental para la interacción con el usuario. Básicamente a los gráficos creados se les puede añadir la característica de animación, dándoles movimiento.

Uno de los métodos de animación que permite realizar Multimedia Toolbook, es el *movimiento de páginas*, es decir se puede crear una secuencia animada mediante el movimiento a través de páginas del libro, mostrando imágenes en posiciones ligeramente diferentes o formas en cada página, como la animación tipo caricatura.

Otra de las formas de obtener animación de objetos es la de *pila de objetos* (stacks of objects) , utilizado para animar imágenes que son de la misma forma y tamaño en una sola página. Toolbook nos ofrece tres maneras de animar una pila de objetos: *showing and Hiding* (Mostrando y Escondiendo), *layering* (método de capas), *Moving On/Off Page* (Moviendo dentro y fuera de la página).

Podemos también lograr el crecimiento o decrecimiento de figuras geométricas, obteniendo las variaciones que sufrirán las figuras en función de las variables que intervengan, este procedimiento se logra mediante la escritura de scripts que indiquen las nuevas posiciones de las figuras.

1.2.7.1 Control de Objetos mediante Comandos

El lenguaje OpenScript tiene comandos para dibujar objetos, así como para manipularlos en varias maneras. Los comandos más útiles se muestran en la **Tabla 1.2**.

COMANDO	FUNCION
DRAW	DIBUJAR
MOVE	MOVER
HIDE	ESCONDER
SHOW	MOVER

Tabla 1.2 Comandos de Control de Objetos

El comando HIDE funciona paralelamente con el comando SHOW y entre los dos el parámetro que los maneja es el tiempo que un objeto debe permanecer escondido para luego aparecer.

1.2.7.2 Comando Window

El Command window es una ventana donde se puede escribir declaraciones de OpenScript para ejecutar comandos y opciones, así como expresiones¹⁰ y correrlas inmediatamente, sin desplegar los menús de Toolbook. Las declaraciones se ejecutan luego de presionar Enter.

Aunque OpenScript es más a menudo usado en la escritura de scripts, este también puede ser utilizado directamente en el Command window para hacer cosas que podrían resultar difíciles o imposibles con un Menú de Comandos.

También se puede escribir o pegar alguna expresión de OpenScript en el Command window, Toolbook evalúa la expresión y despliega el resultado en este comando.

¹⁰ Se tratará este tema en la parte del Desarrollo del Módulo de Diseño y Simulación.

El Command Window se despliega presionando Shift+F3, obteniéndose la ventana (Ver figura 1.8), en la cual se escribirán las declaraciones.

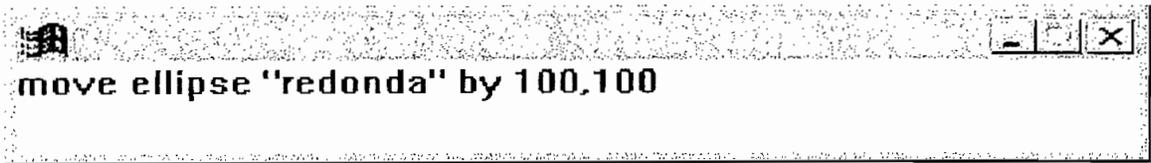


Figura 1.8 Command Window

1.2.7.3 Animación por Efectos Visuales

OpenScript tiene comandos que se pueden usar para navegar entre páginas y libros. Este también tiene comandos que pueden usarse para crear diferentes efectos visuales cambiando páginas.

Toolbook provee tres tipos de efectos especiales que son:

- ❖ fxZoom: Ampliar Rápidamente
- ❖ fxDissolve: Desvanecer
- ❖ fxWipe: Limpiar

1.2.8 PERSONALIZANDO LA BARRA DE MENÚS

Se puede usar el lenguaje OpenScript para personalizar la barra de menús y los submenús de cada uno, que aparecen tanto en el nivel de autor como en el nivel de lector, como son: File, Edit, Text, etc. Ponemos menús o submenús según las necesidades del programador y de lo que se requiera en el nivel de lector.

Para el presente trabajo se optó por remover algunos menús en el nivel de lector, es decir se presenta al usuario los siguientes menús necesarios y suficientes para trabajar en el nivel de lector.

Menú	Submenú
File	Open (Abrir archivo) Save (Guardar Archivo) Save As (Guardar como) Printer Setup (Setear Impresora) Print Pages (Imprimir Páginas) Exit (Salir de Programa)
Edit	Autor ¹¹ (Cambiar a nivel de Autor)
Text	Show hotwords (Mostrar hotwords)
Page	Next (Ir a página Siguiete) Previous (Ir a página Anterior) Back (Atrás) Search (Buscar)

Los menús y submenús indicados anteriormente se escogieron como los importantes para que el usuario pueda trabajar y navegar por el libro desarrollado.

¹¹ El presente libro desarrollado contiene contraseña para el cambio a nivel de autor, por si se quiere realizar cambios al trabajo realizado.

El submenú Previous nos da la posibilidad de ir a la página anterior, por ejemplo si estamos en la página 50 y dar un clic en esta opción, aparecerá la página 49.

En cambio el submenú Back nos enviará a la página anteriormente abierta.

El submenú Search es un comando de búsqueda de palabras en los campos que se encuentran en el libro desarrollado, dichas palabras a buscar se especifican en el Search dialog box (Cuadro de diálogo buscar), que se muestra en la figura 1.9.

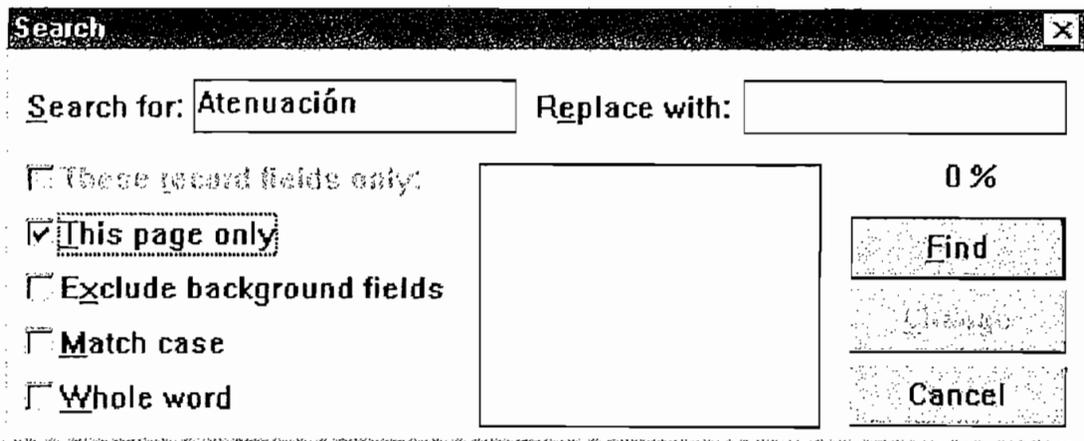


Figura 1.9 Cuadro de Diálogo Buscar

Search for: Buscar por

Replace with: Reemplazar con

These record fields only: Buscar solo en este campo de registro

This page only: Sólo en esta página

Exclude background fields: Excluir campos en backgrounds

Match case: Combinar

Whole word: Palabras enteras

Las opciones que muestra este cuadro de diálogo nos indican la manera como se buscan las palabras.

La búsqueda se inicia desde donde se está actualmente trabajando y continúa hasta el final del libro. Cuando llega al final del libro, se despliega un mensaje que permite escoger el inicio de búsqueda de nuevo desde la primera página.

1.2.9 COMPLEMENTO DE ANIMACIÓN: AUDIO Y VIDEO

Para lograr una mayor interacción entre el programa desarrollado y el usuario, además de la animación de objetos en un libro, se puede integrar audio y video, con el hardware y software necesario.

Para la integración de audio es indispensable poseer una tarjeta de sonido con su respectivo driver (controlador) más micrófono que permita la grabación de voz si es que se quiere audio explicativo del libro desarrollado o simplemente la reproducción de música. Toolbook maneja formatos de audio con extensión .WAV (archivos de sonido de baja calidad), por tanto se necesita del software necesario que maneje este tipo de archivos, uno de tantos programas que trabajan con estas extensiones es el Reproductor Multimedia de Windows, el cual puede ser utilizado.

Mediante programación en Toolbook, se puede controlar los dispositivos de grabación y reproducción, así como los archivos de audio, habilitando y deshabilitando los puertos que permiten escuchar o no el sonido.

La integración de video implica la implementación en el computador del hardware y software necesario, como es la cámara y sus controladores, que realizan el proceso de conversión analógica a digital. O directamente se puede utilizar cámaras digitales.

Cualquiera de las opciones representan una inversión económica costosa, por lo que se puede limitar a la integración de audio.

1.3 INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN.

Este Módulo, involucra el diseño y simulación de los circuitos optoelectrónicos de transmisión y recepción que intervienen en un enlace mediante fibra óptica, así como también los criterios de diseño de enlaces de fibra óptica.

Para obtener la máxima interacción entre el usuario y el computador, nos valemos de las facilidades de Toolbook para trabajar con pantallas, como si fueran las páginas de un libro, para ingresar en una misma página los parámetros o datos de entrada que en este caso serían: voltaje, corriente, etc; los resultados se obtienen mediante las ecuaciones matemáticas que se utilizan en el diseño de enlaces por fibra óptica. Cabe indicar que en la misma página se podrá apreciar el circuito diseñado y su simulación mediante botones provistos, los cuales nos servirán de hiperenlaces.

Para obtener lo anteriormente descrito, nos valemos de las herramientas de programación que nos ofrece Toolbook, que serán descritas a continuación.

1.3.1 CONTENEDORES (CONTAINERS)

Los Containers en Toolbook son aquellos que tienen la propiedad de retener o almacenar temporalmente un valor, esta propiedad puede ser aprovechada para almacenar los valores involucrados en el diseño de un circuito. A los contenedores se les conoce como *variables* en el lenguaje OpenScript, entonces en una variable puede retenerse un valor.

En OpenScript se tiene dos tipos de variables: variables de sistema y variables locales. Las variables de sistema retienen el valor aún cuando el handler haya

finalizado, además pueden ser compartidas entre handlers, en cambio las variables locales son descartadas.

Una de las variables de sistema o variable especial más usada es la variable "It" y es utilizada como variable por defecto en OpenScript, aunque se utilicen comandos específicos; OpenScript coloca el resultado de la operación realizada en dicha variable.

1.3.1.1 Listas

Es aquella que contiene items (artículos) los cuales están separados por comas. Por ejemplo, la siguiente lista contiene cuatro items: coaxial, x1, fibra óptica, y2. Nótese que aunque "fibra óptica" es de dos palabras, representa un solo item en la lista.

1.3.1.2 Expresiones

Una expresión consiste de uno o más valores separados por operadores como +, -, & y otros. Por ejemplo "100", "100+5", "3<5", "5>3" son todas expresiones. Toda expresión tiene un resultado.

Hay tres tipos de expresiones en OpenScript:

Numéricas. Su resultado es un número, por ejemplo $20/6=3.3333333333333333$

String Resulta la unión o combinación de caracteres
(por ejemplo: "Fibra" & "Optica" = "FibraOptica")

Lógicas El resultado es Verdadero (True) o Falso (False)
(por ejemplo: $8 < 45 = \text{True}$)

1.3.2 COMANDOS DE PREGUNTAS Y REQUERIMIENTOS (ASK AND REQUEST)

Los comandos de Pregunta (Ask) y Requerimiento (Request) son útiles para recibir información u opciones que ingrese el usuario. El comando ask se usa para pedir al usuario que ingrese algún dato, que puede ser texto o números. Cualquier dato que el usuario escriba es colocado en la variable especial, It.

El comando request despliega un mensaje el cual indica al usuario que haga un "click" con el mouse en uno de los botones de respuesta. El texto del botón "clickeado" es colocado en la variable especial, It.

1.3.3 ESTRUCTURAS DE CONTROL

El lenguaje OpenScript tiene algunas Estructuras de Control, tanto para realizar bifurcaciones como para lazos de repetición, dentro de un Script.

- ❖ **Estructuras de Control para Bifurcación.-** para bifurcación se tiene dos tipos de estructuras: if / then / else (si / entonces / caso contrario) y conditions / when / else (condiciones / cuando / caso contrario).
- ❖ **Estructuras de Control para Lazos.-** se tiene tres tipos de estructuras: step (paso), do / until (hacer / hasta) y while (mientras).

1.3.4 COMANDO DRAW

Este comando es muy útil para desarrollar la parte de simulación del trabajo, ya que se simulará algunos de los circuitos de transmisión y recepción que son útiles en una transmisión mediante fibra óptica, los cuales dan una respuesta lineal, lineal angular o curvas (sinusoide).

Este comando es usado para crear objetos, realiza la misma acción que las herramientas de crear líneas, polígonos, curvas, que se encuentran en la paleta de creación de objetos, seleccionando una de ellas se presiona el botón primario del mouse en una ubicación de la pantalla para luego arrastrar el mouse hasta otra ubicación de la pantalla en donde se quiere el final de la figura, entonces se suelta el botón.

El comando Draw en OpenScript tiene la siguiente sintaxis:

Draw <tool> from <ubicación inicial> to <ubicación final>

El parámetro <tool> de este comando se refiere a la herramienta (tool) a dibujar, que puede ser:

AngledLine	irregularPolygon	roundedRectangle
Arc	line	
Curv	polygon	
Ellipse	rectangle	

Los parámetros ubicación inicial y ubicación final, especifica un punto en la pantalla representado por dos números separados por una coma (x , y). El primer número es la distancia desde el borde izquierdo de la pantalla. El segundo número es la distancia desde el borde superior de la pantalla.

1.3.5 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN

En este módulo se presentan el diseño y simulación de circuitos de transmisión y recepción, recomendados por fabricantes de elementos optoelectrónicos, además de criterios generales de diseño de un enlace por fibra óptica. Como ejemplo en la

figura 1.10 se muestra una de las páginas desarrolladas para un circuito básico de transmisión de señales TTL a través de fibra óptica, utilizando como fuente óptica el diodo infrarrojo MFOE3100 fabricado por Motorola Semiconductors.

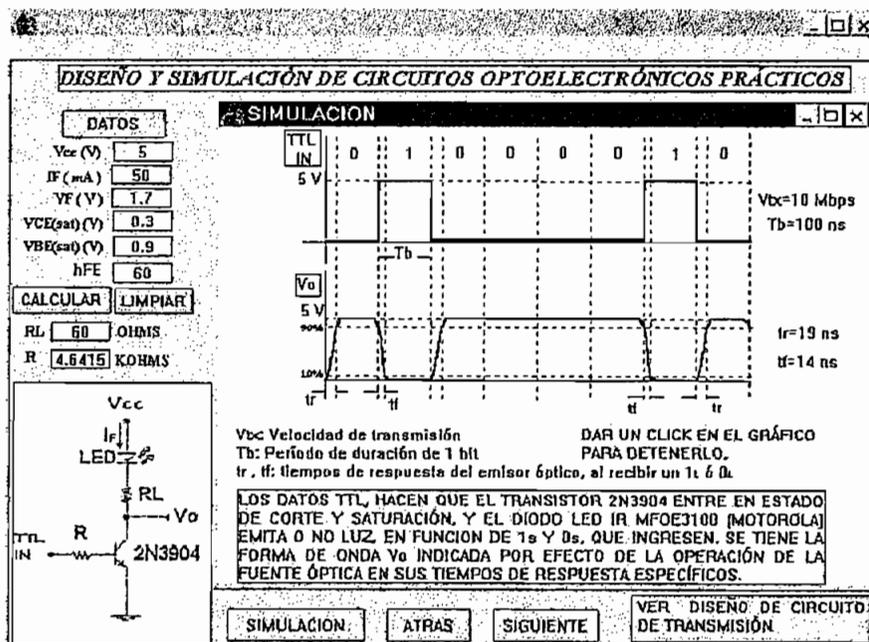


Figura 1.10 Página desarrollada en el Módulo de Diseño y Simulación

Para que el programa computacional desarrollado sea interactivo con el usuario, en este módulo se dispone de botones de navegación, como se muestra en la figura anterior, la página desarrollada posee los siguientes botones:

LIMPIAR: para resetear los valores ingresados y colocar otros

CALCULAR: al presionar este botón, realiza los cálculos necesarios y muestra los resultados

DISEÑO: muestra los criterios para el diseño del circuito mencionado

SIMULACIÓN: realiza una simulación de circuitos optoelectrónicos utilizados en un enlace por fibra óptica

Además posee botones con texto de ayuda para indicar los parámetros que se muestran en cada una de las páginas.

A continuación en los siguientes capítulos se tiene la parte teórica de Comunicaciones ópticas, así como también los criterios de diseño de enlaces por fibra óptica.

CAPITULO II

MODULO TEORICO. CONCEPTOS DE COMUNICACIONES OPTICAS. ELEMENTOS DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 RESEÑA HISTÓRICA

El uso de la luz para propósitos de comunicaciones es una idea muy antigua. Señales de humo y fuego fueron usadas en civilizaciones antiguas. Los griegos usaron espejos y rayos de sol aproximadamente 800 años AC. La idea de emplear la luz para transmitir información se utilizó a fines del siglo XVI empleando lámparas.

Historia de las fibras ópticas

El desarrollo del uso de la fibra óptica se detalla a continuación, cronológicamente:

1.790.- Claude Chappe construyó un telégrafo óptico que permitía transmitir información, cubriendo distancias de hasta 200 Km. en tan sólo 15 minutos y que fue reemplazado con la llegada del telégrafo eléctrico.

1.870.- El físico inglés John Tyndall, demuestra ante la British Royal Society, la posibilidad de propagar luz en una trayectoria curvilínea, mediante el fenómeno de la reflexión total, al utilizar como guía de onda el chorro de agua que salía de interior de una botella. La fuente de luz estaba en el interior de la botella.

1.889.- Alexander Graham Bell, inventa un aparato llamado "Photophon", que permitía transmitir la voz a través de una onda lumínica.

1.910.- Hondros y Deybe complementan los estudios teóricos sobre la propagación de la luz en la guías de onda dieléctricas.

1.934.- el norteamericano Norman R. French, patenta un sistema telefónico óptico, describiendo cómo las señales de voz se propagarían por medio de una red de conductores ópticos construidos con varillas rígidas de vidrio, guía de onda.

1.958.- Arthur Schawlow y Charles H. Townes, desarrollan el *láser* y obtienen, por su descubrimiento, el Premio Nobel. En ésta época se emplea por primera vez el término "*Fibra óptica*".

Con el paso del tiempo el *láser* se posicionaría como la fuente de luz idónea para las comunicaciones ópticas.

1.960.- Theodor H. Maiman, utiliza el *láser* por primera vez como fuente de luz para las comunicaciones ópticas.

1.962.- se desarrollan los *láseres* con elementos semiconductores, así como los fotodiodos utilizados como receptores.

1.966.- los ingleses Charles R. Kao y George A. Hochman, investigadores de Standard Telecommunications Laboratories, proponen la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión.

Mantuvieron que los medios de atenuación que se obtenían en su época, del orden de 1.000 dB/Km., eran motivados por la escasa pureza de los materiales empleados en la fabricación de la fibra óptica.

Llegaron a predecir que con los procesos adecuados se llegaría a obtener valores de atenuación del orden de 20 dB/Km.

1.970.- los norteamericanos Kapron, Keck y Mauner, investigadores de Corning Glass Works, obtuvieron valores de atenuación inferiores a los 20 dB/Km, trabajando con longitud de onda de 633 nm y fibras ópticas multimodo de índice de refracción escalonado.

1.972.- en los mismos laboratorios de Corning Glass Works se obtuvieron valores de atenuación de 4 dB/Km, con una longitud de onda de 800 nm y fibras ópticas multimodo de índice de refracción escalonado.

1.973.- se instaló el primer sistema telefónico comercial, en la planta de Western Electric, en Atlanta, EE.UU. en el que se utilizaba como medio de transmisión la fibra óptica.

1.976.- M. Houriguchi de N.T.T Communications y H. Osanai, de Fujikura, anunciaron el inicio de producción de fibras ópticas monomodo que presentan atenuación de 0,47 dB/Km. para una longitud de onda de 1.200 nm.

En este mismo año Siemens pone en funcionamiento un tramo experimental para la transmisión de señales bajo norma R.D.S.I., telefonía y videoteléfono con una distancia de 2,1 Km. en la ciudad de Berlín.

1.977.-

1. Hartman, Schumaker y Dixon descubren las altas prestaciones de láser de Ga-As-Al; de funcionamiento continuo y con larga vida.

2. Bell Systems pone en funcionamiento un enlace telefónico óptico en un tramo de 2,5 Km. en Chicago, EE.UU.

3. El Post Office británico realiza pruebas experimentales con un sistema de transmisión óptico de 140 Mbps en un tramo de 9 Km. entre Hitchin y Stevenhage.

1.978.- N.T.T. realiza un enlace experimental óptico con un sistema de transmisión de 32 Mbps. Se utilizó como fuente de luz un láser, trabajando en una longitud de onda de 1.270 nm, para un tramo de 53 Km. y sin repetidores intermedios.

1.979.-

1. N.T.T., realiza un enlace experimental con un sistema de transmisión de 100 Mbps. Se utilizó como fuente de luz un láser de In-Ga-As-P, trabajando en una longitud de onda de 1.500 nm con fibra óptica monomodo en un tramo de 29 Km. y sin repetidores intermedios.

2. N.T.T. realiza un enlace experimental con un sistema de transmisión de 400 Mbps. Se utilizó como fuente de luz un láser de In-Ga-As-P, trabajando en una longitud de onda de 1.500 nm con fibra óptica monomodo en un tramo de 18 Km. y sin repetidores intermedios.

En la actualidad

Las fibras ópticas monomodo comerciales que se utilizan presentan valores de atenuación inferiores a 0,3 dB/km.

Los equipos que se utilizan actualmente en las transmisiones ópticas trabajan con velocidades normalizadas de 2 Mbps, 8 Mbps, 34 Mbps, 140 Mbps, 565 Mbps y 2.5 Gbps.

Las longitudes de onda de trabajo adoptadas para los equipos de comunicaciones ópticas actualmente están centradas en los 1.330 nm y 1.550 nm. La longitud de onda de 850 nm no es muy utilizada.

Las secciones de regeneración en el caso de las fuentes ópticas equipadas con diodos láser son del orden de 50 Km.

2.1.2 OBJETIVOS DE LA TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA

El objetivo principal es transmitir la información a la mayor distancia posible con el mayor ancho de banda analógico o a gran velocidad de transmisión digital, para cumplir con esto se requiere lo siguiente:

Mínima Atenuación: La atenuación es la pérdida de energía conforme la señal se propaga hacia su destino. En medios guiados como la fibra óptica, la señal decae en forma logarítmica con la distancia.

La atenuación de la luz dentro de la guía de onda de vidrio depende de la longitud de onda¹² de la luz, como se indica en la **figura 2.1**, en la cual se muestra la atenuación para el vidrio usado en la fibra óptica, en decibeles por kilómetro lineal de fibra y está dada por la relación:

$$\text{Atenuación (db)} = 10 * \log_{10} \frac{\text{energía.transmitida}}{\text{energía.recibida}}$$

¹² El término longitud de onda se especificará más adelante cuando se trate del espectro electromagnético

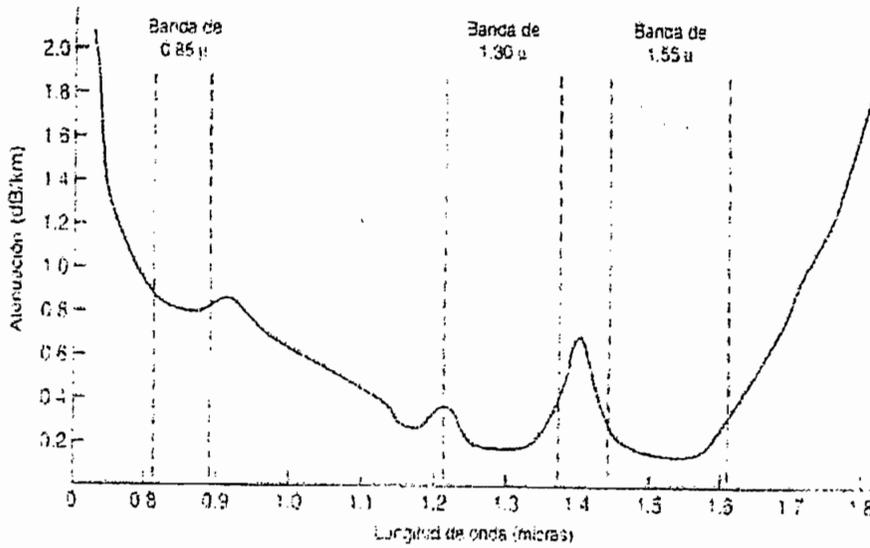


Figura 2.1 Atenuación de la luz dentro de una fibra

Mínima *Dispersión*: La dispersión corresponde a los fenómenos que producen un *retardo* de transmisión de la señal, lo que produce un ensanchamiento de la misma, lo que limita la capacidad de transmisión. La dispersión son todos los factores que dan diferencias en el tiempo de propagación de las componentes de un paquete de ondas.

Utilizar los mejores *Emisores y Receptores*: principalmente en la parte de los emisores la selección radica en el espectro de emisión o diagrama de radiación, lo que implica la potencia de salida necesaria y la velocidad de transmisión requerida, para el caso de comunicaciones ópticas los emisores a usarse son el diodo LED o el diodo LASER o LD, este presenta un espectro más aceptable para la transmisión por ser más estrecho, es decir mayor potencia de salida que el LED, además de presentar mejores posibilidades de acoplamiento con la fibra, lo indicado anteriormente se puede observar en la **figura 2.2**. En lo que respecta a receptores ópticos los mayormente utilizados son el diodo PIN y el APD.

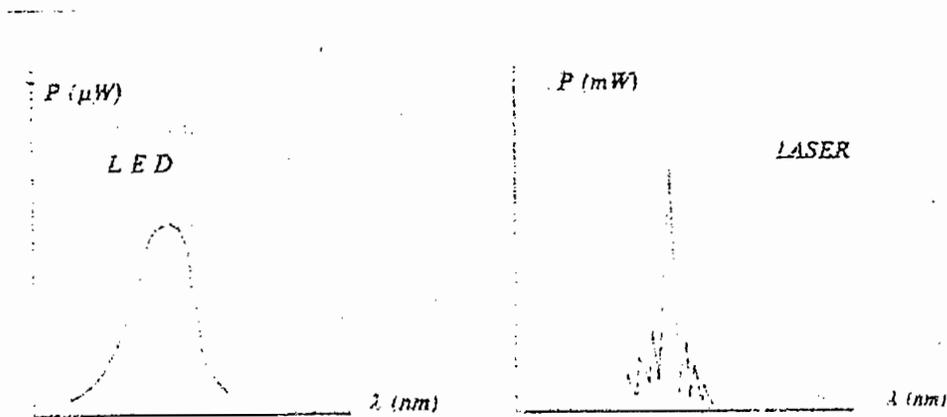


Figura 2.2 Espectros de radiación de diodo LED y diodo LASER

Usar la *Óptica Integrada*: Los actuales sistemas de comunicaciones por fibra tienden al uso de sistemas ópticos integrados que remplazan a los procesos de conversión electroóptica (E/O) y optoelectrónica (O/E), que se tenían en los tramos intermedios de transmisión en los que se necesita regenerar la señal transmitida.

Actualmente la tecnología WDM (Multiplexación por división de longitud de onda) permite transmitir información en un rango amplio de distancias entre emisor y receptor. En distancias cortas la atenuación de la fibra (mínima para una longitud de onda de 1550 nm) y la dispersión (mínima para 1300 nm) no representan un gran problema. Sin embargo para largas distancias estos fenómenos son un factor a tener en cuenta, por lo que se requiere el uso de amplificadores / repetidores ópticos. Dichos elementos serán tratados más adelante.

2.1.3 SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

Todo Sistema de Comunicaciones Ópticas cumple la función de transferir información entre dos puntos, a través de un medio de transmisión denominado Fibra Óptica.

La necesidad del uso de estos sistemas de comunicación, nace en los países que tienen un alto desarrollo tecnológico en cuanto a telefonía se refiere, ya que las redes telefónicas montadas presentaban problemas de saturación, para lo cual una de las soluciones era conseguir medios de transmisión de mayor capacidad que los utilizados en dichas redes.

Aquellas redes de gran capacidad de tráfico utilizaban cables coaxiales o enlaces de radio de mayor capacidad, pero al aumentar el número de enlaces por la demanda de tráfico, se necesita de un mayor ancho de banda y por ende el empleo de frecuencias elevadas, por tanto era necesario el uso de repetidores para los tramos de cable coaxial, debido a que la atenuación de las señales transmitidas en el cable coaxial es alta. Igualmente sucedía con la transmisión por medio de enlaces de radio pero en este caso se tenía la saturación del espectro electromagnético, que más adelante se detallará.

Todos estos agravantes hacen que se realicen investigaciones sobre la fibra óptica como opción de medio de transmisión que sustituirá a los anteriores nombrados.

En teoría un sistema de transmisión por fibra óptica es similar a un sistema de microondas en algunos aspectos, la diferencia radica en el medio de transmisión que para microondas es el espacio libre y para el otro caso es una guía de ondas de vidrio, además la transmisión en un sistema óptico tiene lugar a frecuencias ópticas las cuales son superiores a las de microondas.

2.1.3.1 Elementos de un Sistema Óptico

Un sistema por fibra óptica básico se muestra en la **figura 2.3**.

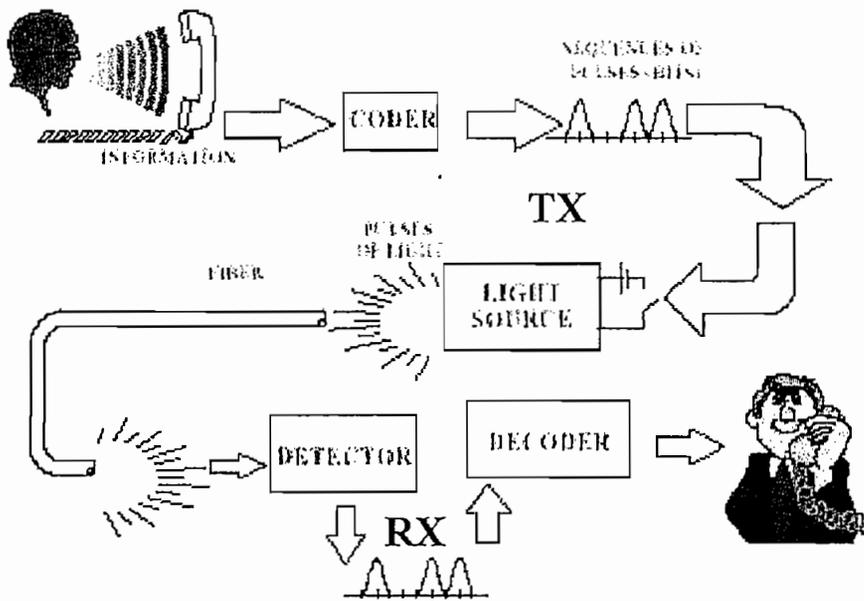


Figura 2.3 Sistema por Fibra Óptica

Transmisor (TX) .- Este bloque contiene los sistemas codificadores (CODER) de la señal incidente, los que codifican la señal incidente usando *códigos de línea*, un modulador y un convertidor electroóptico (E/O) que puede ser un diodo LED o un diodo LASER, el cual genera la onda portadora luminosa la que ha de transportar la información sea esta analógico o digital a través de la fibra óptica hacia el detector.

Conector.- Es utilizado para adaptar el emisor y receptor óptico a la fibra óptica y para empalmar tramos de fibra óptica.

Regenerador.- El uso de regeneradores en un enlace por fibra óptica depende de la potencia de transmisión y del tipo de fibra óptica, antes de que los factores de atenuación y dispersión de la señal incidente la hagan irreconocible para el receptor. El regenerador amplifica y restituye el nivel de la señal que puede haberse atenuado. En la **figura 2.4** se muestra el regenerador en un enlace.

Cabe indicar que en los enlaces mediante fibra óptica además de las señales de información, se incluyen señales de sincronismo, de supervisión y de control de errores (BER¹³).

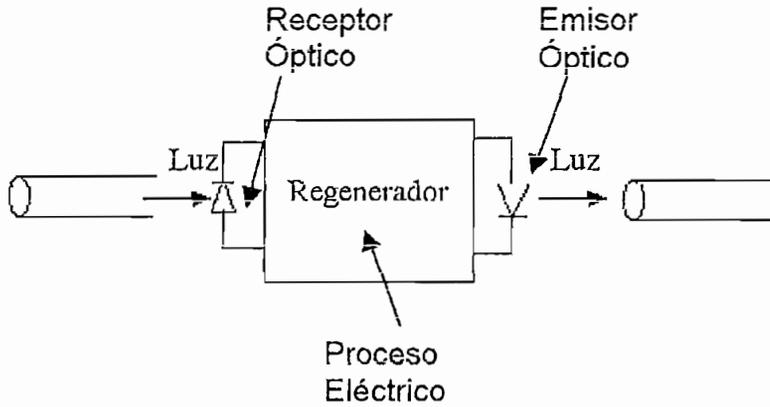


Figura 2.4 Regenerador en un Enlace Óptico

Para el proceso de regeneración de la señal procedente de la fibra óptica, hay que realizar una conversión optoeléctrica (O/E) mediante un receptor óptico PIN (Positive Intrinsic Negative) o APD (Avalanche Photo Diode), en este procedimiento la señal óptica (luz) es transformada a señal eléctrica la cual ingresa al regenerador para ser tratada, luego de lo cual debe pasar por un proceso de conversión electroóptico (E/O) mediante un LED o LD, para luego transmitirla por la fibra óptica en forma de luz.

Receptor (RX).- Esta compuesto por un sistema decodificador (DECODER) y el detector óptico (O/E) que puede ser un diodo PIN o APD, además de una etapa de amplificación que lleva la señal al nivel óptimo para su reconocimiento en esta etapa.

¹³ La tasa de bits errados (BER) es la relación entre el número de bits errados respecto al número de bits transmitidos.

2.1.4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Si las ondas electromagnéticas se organizan de acuerdo a sus longitudes obtenemos el espectro electromagnético en donde las ondas mas largas (longitudes desde metros a kilómetros) se encuentran a la derecha (Radio) y las mas cortas (longitudes de onda de una billonésima de metros) a la izquierda (Gamma). En la figura 2.5 se muestra el espectro electromagnético.

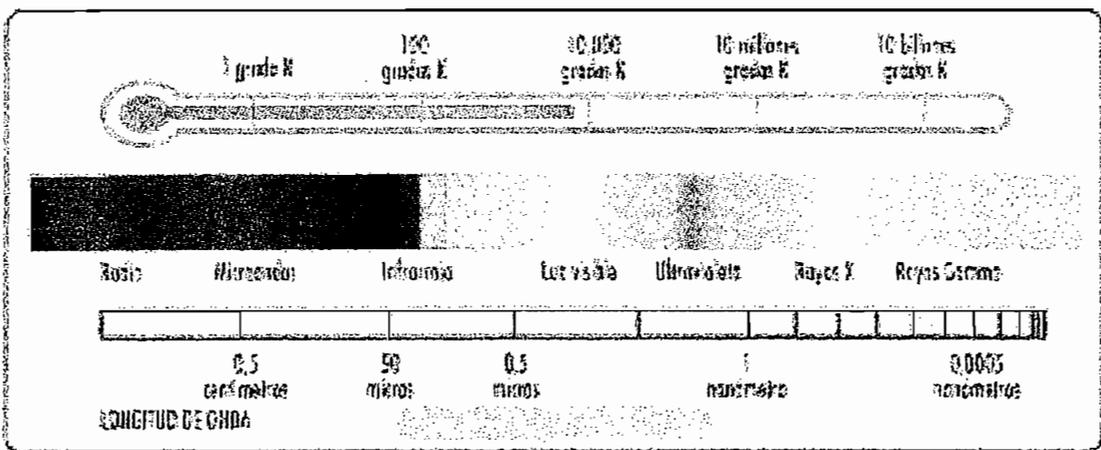
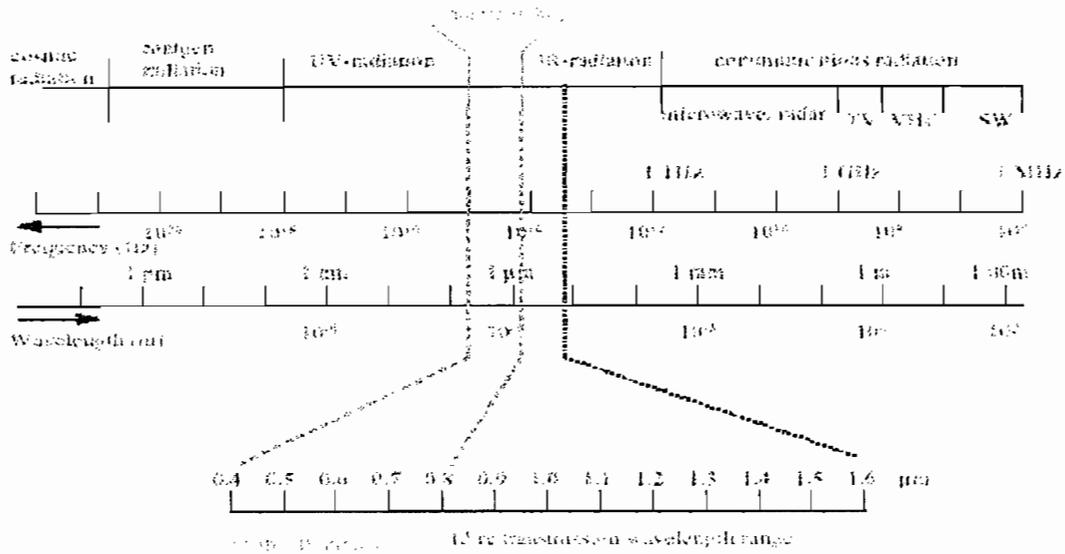


Figura 2.5 Espectro Electromagnético

Rayos Gamma.- Fueron descubiertos por Henry Becquerel en 1876 cuando encontró que unas placas fotográficas cubiertas con plomo se velaron al estar colocadas junto a un trozo de Uranio. Los rayos Gamma son los mas energéticos

del espectro (10^4 eV hasta 10^{19} eV) y con menor longitud de onda. En el espectro estos rayos se extienden desde los 5×10^{19} Hz hasta aproximadamente los 10^{22} Hz. (longitud de onda entre los 6×10^{-12} y 3×10^{-14} m).

Rayos X.- Los rayos X fueron descubiertos por el Físico William Roentgen en 1895, cuando observó que una radiación invisible podía atravesar la piel y los músculos para dibujar los huesos de un ser vivo en una placa. Los denominó X por ser totalmente desconocidos. La región de los rayos X va desde los $2,4 \times 10^{16}$ a los 5×10^{19} Hz, con longitud de onda muy reducida inferior a dos diámetros atómicos.

Rayos Ultravioleta.- Localizados entre los rayos X y el espectro de luz visible, los rayos ultravioleta fueron descubiertos por Johann Wilhelm Ritter en 1801 al lograr oscurecer sales de plata exponiéndolas mas allá del extremo violeta de la luz visible. Constituyen una parte importante de la luz que envía el Sol a la Tierra.

Estos rayos tienen tal energía que producen ionización de átomos y como consecuencia se forma la ionosfera en la tierra. Este fuerte efecto químico los hace tóxicos para la vida llevando a producir mutaciones cancerígenas en la piel.

El Ozono es la sustancia encargada en nuestra atmósfera de absorber los rayos ultravioleta e impedir que lleguen a nosotros. La región ultravioleta del espectro se extiende desde los 8×10^{14} Hz hasta los $3,4 \times 10^{16}$ Hz. (con longitud de onda de $3,75 \times 10^{-7}$ a 8×10^{-9} m).

Luz Visible.- Isaac Newton fue el primero en descomponer la luz visible blanca del Sol en sus componentes mediante la utilización de un prisma. La luz blanca esta constituida por la combinación de ondas que tienen energías semejantes y es debido a que ninguna de estas predomina sobre las otras. La radiación visible va desde 384×10^{12} hasta 769×10^{12} Hz.

Rayos Infrarrojos.- La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo William Herschel en 1800, al medir la alta temperatura mas allá de la zona roja del espectro visible. La radiación infrarroja se localiza en el espectro entre $3 \cdot 10^{11}$ Hz. hasta aproximadamente los $4 \cdot 10^{14}$ Hz. La banda infrarroja se divide en tres secciones: próxima a lo visible (780 - 2500 nm), intermedia (2500 - 50000 nm) y lejana (50000 nm - 1mm). Toda molécula que tenga un temperatura superior al cero absoluto (-273° K) emite rayos infrarrojos y estos serán mayores entre mas temperatura tenga el objeto.

Microondas.- La región de las microondas se encuentra entre los 10^9 hasta aproximadamente $3 \cdot 10^{11}$ Hz (con longitud de onda entre 30 cm a 1 mm).

En la tecnología de las fibras ópticas se habla en términos de longitud de onda, en lugar de hacerlo en frecuencias, encontrándose ambas magnitudes ligadas por la relación;

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

donde λ , es la longitud de onda del haz de luz en el medio considerado, c la velocidad de la luz en el mismo medio y f la frecuencia de la onda luminosa.

Si ahora consideramos la zona espectral óptica, cuya frecuencia se sitúa en torno a los 10^{14} Hz, y suponiendo que se utilizasen las técnicas MDF¹⁴, la capacidad potencial de este medio de transmisión sería 10^7 veces la de un cable coaxial y 10^4 veces la de un enlace de radio de microondas.

Esta posibilidad, por sí sola. ya justifica el empleo del espectro óptico en las comunicaciones.

¹⁴ MDF: método de modulación por división de frecuencia

Pero la utilización de la luz como portadora de información exige disponer de una fuente de determinadas características y de hecho fue la disponibilidad del LD como fuente de luz coherente¹⁵ y monocromática lo que estimuló la exploración de las comunicaciones ópticas como soporte de altos flujos de información, debido a la alta frecuencia de la portadora.

En la década de los años sesenta comenzaron los estudios básicos sobre los procesos de modulación y detección de la luz, que eran necesarios para llevar a cabo las conversiones electroópticas imprescindibles en la transmisión de señales por medio de la luz.

Las ondas de radio, la radiación infrarroja, la luz visible, los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma son distintas manifestaciones del mismo fenómeno que es la luz. No hay ninguna diferencia básica cualitativa entre ellas; únicamente difieren en el valor de la frecuencia de la radiación: mayores frecuencias corresponden a radiaciones más energéticas (rayos X, rayos gamma) y menores frecuencias a las menos energéticas (ondas de radio).

2.1.5 CONCEPTOS

2.1.5.1 Fibra Óptica

Es un filamento de vidrio sumamente delgado y flexible (de 2 a 125 micrones) capaz de conducir rayos ópticos (señales en base a la transmisión de luz). Las fibras ópticas poseen capacidades de transmisión enormes, del orden de miles de millones de bits por segundo. Se utilizan varias clases de vidrios y plásticos para su construcción.

Una fibra es un conductor óptico de forma cilíndrica que consta del núcleo (core) de vidrio, un manto o revestimiento (cladding) de vidrio, que tienen propiedades

¹⁵ El término monocromático se refiere a que el diodo láser produce una radiación en la cual todos los fotones que la componen oscilan en la misma frecuencia, así mismo una radiación monocromática puede ser polarizada si todos los fotones que la integran oscilan en un mismo plano; si además lo hacen en fase, nos hallamos ante una radiación coherente.

ópticas diferentes de las del núcleo, y un recubrimiento (coating) de plástico, este sería el caso para un solo conductor de fibra , pero si se tiene muchas fibras compactas se le añade una cubierta exterior (jacket) que absorbe los rayos ópticos y sirve para proteger al conductor del medio ambiente así como darle resistencia mecánica, como se indica en la **figura 2.6**.

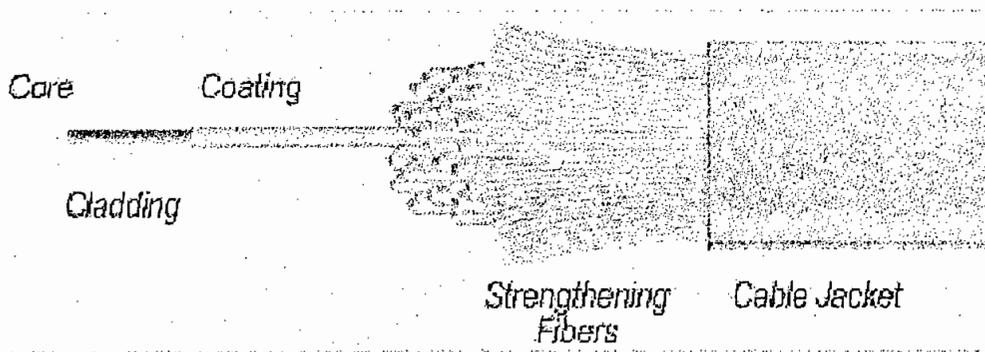


Figura 2.6 Elementos de la Fibra Óptica

Como Portadora de Información.- En poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información. Este novedoso material vino a revolucionar los procesos de las telecomunicaciones en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión y disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias hasta multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica. Las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza extremadamente compactos: El grosor de una fibra es similar a la de un cabello humano. Fabricadas a alta temperatura con base en el silicio, su proceso de elaboración es controlado por medio de computadoras, para permitir que el índice de refracción de su núcleo, que es la guía de la onda luminosa, sea uniforme y evite las desviaciones, entre sus principales características se puede mencionar que son compactas, ligeras, con bajas pérdidas de señal, amplia capacidad de transmisión y un alto grado de confiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas de radio-frecuencia.

Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables sin ningún componente conductivo y pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión.

Tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no hay problemas debido a los cortos circuitos Tienen un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el costo por canal; de esta forma es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre.

Con un cable de seis fibras se puede transportar la señal de más de cinco mil canales o líneas principales, mientras que se requiere de 10,000 pares de cable de cobre convencional para brindar servicio a ese mismo número de usuarios, con la desventaja que este último medio ocupa un gran espacio en los ductos y requiere de grandes volúmenes de material, lo que también eleva los costos.

Comparado con el sistema convencional de cables de cobre donde la atenuación de sus señales, (Decremento de la señal) es de tal magnitud que requieren de repetidores cada dos kilómetros para regenerar la transmisión, en el sistema de fibra óptica se pueden instalar tramos de hasta 70 km, sin que exista necesidad de recurrir a repetidores o amplificadores ópticos lo que también hace más económico y de fácil mantenimiento.

Originalmente, la fibra óptica fue propuesta como medio de transmisión debido a su enorme ancho de banda; sin embargo, con el tiempo se ha planteado para un amplio rango de aplicaciones además de la telefonía, automatización industrial, computación, sistemas de televisión por cable y transmisión de la información de imágenes de alta resolución, entre otros.

2.1.5.1.1 Características de las Fibras Ópticas

Material de la Fibra

La mayoría de las fibras ópticas se hacen de arena o sílice, materia prima abundante en comparación con el cobre. con unos kilogramos de vidrio pueden fabricarse aproximadamente 43 kilómetros de fibra óptica. Los dos constituyentes esenciales de las fibras ópticas son el núcleo y el revestimiento. el núcleo es la parte más interna de la fibra y es la que guía la luz.

Características Técnicas

La fibra óptica es un medio de transmisión de información analógica o digital. Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio a la velocidad de la luz.

Básicamente, la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica, por la cual se efectúa la propagación, denominada núcleo y de una zona externa al núcleo y coaxial con él, totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación, y que se denomina revestimiento o manto.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características:

- a) Del diseño geométrico de la fibra
- b) De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración.
(diseño óptico)
- c) De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esta anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra

Presenta dimensiones más reducidas que los medios preexistentes. Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 o 10 mm. y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos.

El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos, redundando en su facilidad de instalación.

El sílice tiene un amplio margen de funcionamiento en lo referente a temperatura, pues funde a 600 °C. La fibra presenta un funcionamiento uniforme desde -550 °C a +125 °C sin degradación de sus características.

Características Mecánicas

La F.O. como elemento resistente no tiene características adecuadas de tracción que permitan su utilización directa.

Por otra parte, en la mayoría de los casos las instalaciones se encuentran a la intemperie o en ambientes agresivos que pueden afectar al núcleo, por lo que es necesario disponer de cubiertas y protecciones de calidad capaces de proteger a la fibra. Para alcanzar tal objetivo hay que tener en cuenta su sensibilidad a la curvatura y microcurvatura, la resistencia mecánica y las características de envejecimiento.

Las microcurvaturas y tensiones se determinan por medio de los ensayos de:

Tensión: cuando se estira o contrae el cable se pueden causar fuerzas que rebasen el porcentaje de elasticidad de la fibra óptica y se rompa o formen microcurvaturas.

Compresión: es el esfuerzo transversal.

Impacto: se refiere a las protecciones del cable óptico.

Enrollamiento: existe siempre un límite para el ángulo de curvatura pero, la existencia del forro impide que se sobrepase.

Torsión: es el esfuerzo lateral y de tracción.

Limitaciones Térmicas: Estas limitaciones difieren en alto grado según se trate de fibras realizadas a partir del vidrio o a partir de materiales sintéticos.

Otro objetivo es minimizar las pérdidas adicionales por cableado y las variaciones de la atenuación con la temperatura. Tales diferencias se deben a diseños calculados a veces para mejorar otras propiedades, como la resistencia mecánica, la calidad de empalme, el coeficiente de relleno (número de fibras por mm²) o el costo de producción.

2.1.5.1.2 *Ventanas de Transmisión*

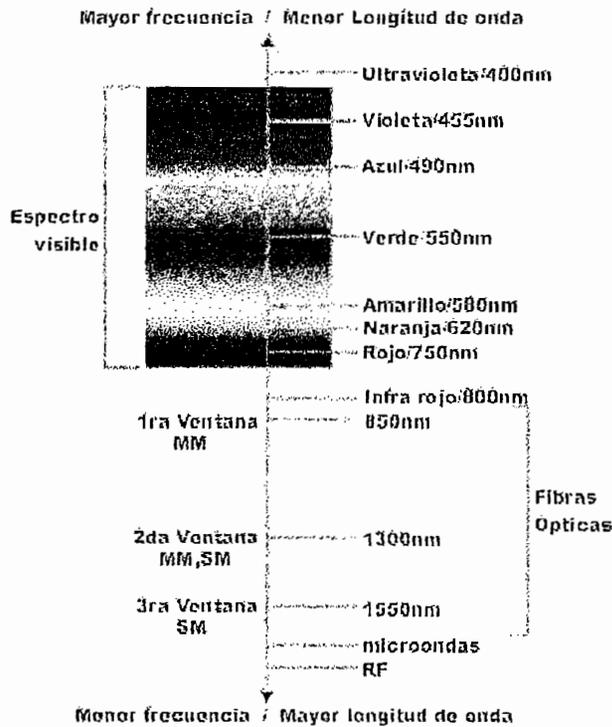
La transmisión de información a través de fibras ópticas se realiza mediante la modulación (variación) de un haz de luz invisible al ojo humano, que en el espectro se sitúa por debajo del infrarrojo.

Las fibras ópticas presentan una menor atenuación (pérdida) en ciertas porciones del espectro lumínico, las cuales se denominan ventanas y corresponden a las siguientes longitudes de onda, expresadas en nanómetros:

Primera ventana 800 a 900 nm, generalmente se usa 850nm

Segunda ventana 1250 a 1350 nm, generalmente se usa 1300nm

Tercera ventana 1500 a 1600 nm, generalmente se usa 1550nm



2.1.5.2 Reflexión

Partimos de que la luz se propaga con una trayectoria rectilínea y con una velocidad constante en cada medio de propagación. Cuando incide en un objeto se producen varios fenómenos como son: Reflexión, Refracción, Absorción-Transmisión, Interferencia, Difracción y Polarización.

En cuanto a la reflexión tenemos diversas clases, pero la que rige en las fibras ópticas es la Reflexión Especular. Este tipo de reflexión tiene lugar al incidir la luz sobre una superficie perfectamente pulimentada, lo cual se logra en el proceso de fabricación de la fibra. En este caso la luz cambia de dirección siguiendo un camino que viene determinado por las Leyes de Snell para la reflexión:

1ª Ley.- El rayo Incidente; la Normal y el rayo Reflejado están en el mismo plano.

2ª Ley.- El ángulo de Incidencia (ángulo formado por el rayo Incidente y la Normal) y el ángulo de Reflexión, son iguales. Como se indica en la figura 2.7.

PLANO EN EL QUE SE ENCUENTRA EL RAYO INCIDENTE, LA NORMAL Y EL RAYO REFLEJADO

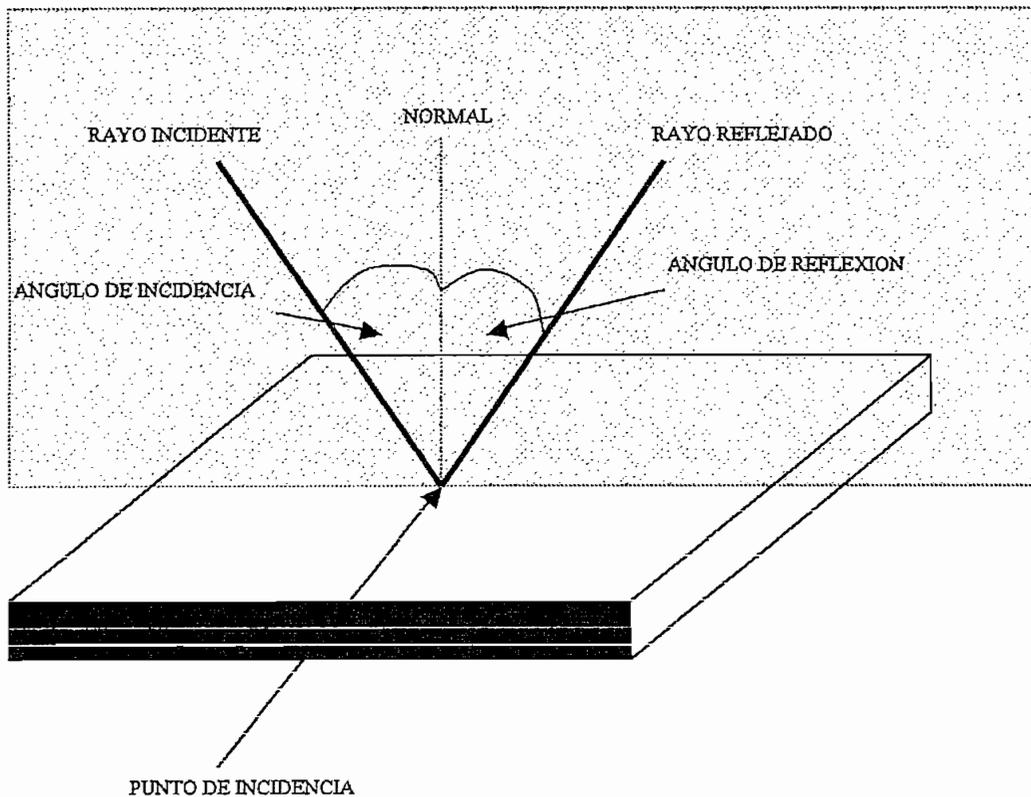


Figura 2.7 Reflexión de un Rayo Incidente

En el caso de Fibra Óptica los medios que involucran el fenómeno de Reflexión son: el núcleo y el manto. En la figura, los medios analizados son el aire y la superficie perfectamente pulida.

2.1.5.3 Refracción

Cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro, sufre un cambio de velocidad, al que acompaña, si no entra perpendicularmente, un cambio de dirección en su trayectoria y dependiendo de cual sea el ángulo de incidencia se produce o no refracción.

Estos cambios de trayectoria se rigen, por las leyes de Snell para la refracción, Ver figura 2.8.

1ª Ley.- El rayo Incidente, la Normal y el rayo Reflejado están en el mismo plano.

2ª Ley.- Los senos de los ángulos de incidencia y de refracción son proporcionales a las velocidades de propagación de la luz en los respectivos medios, como se indica en la siguiente fórmula:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

donde: n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada uno de los medios y que tiene relación con las velocidades de propagación, la definición del índice de refracción se detallará a continuación.

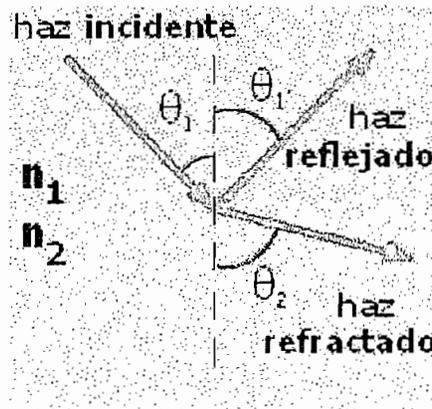


Figura 2.8 Efecto de Refracción en dos medios de propagación

Esto quiere decir que la trayectoria de la luz sufre un cambio en su dirección cuando cruza la superficie de separación de dos medios diferentes de distinta densidad, que para el caso de las fibras ópticas estos medios son el núcleo y el manto, como consecuencia de la diferente velocidad de propagación en cada uno de estos medios.

2.1.5.4 Índice de Refracción (n)

Cuando un haz de luz que se propaga por un medio e ingresa a otro distinto, una parte del haz se refleja mientras que la otra sufre una refracción, que consiste en

el cambio de dirección del haz. Para explicar este fenómeno se utiliza el llamado índice de refracción del material, que nos servirá para calcular la diferencia entre el ángulo de incidencia y el de refracción del haz (antes y después de ingresar al nuevo material).

El efecto de la refracción se puede observar fácilmente introduciendo una varilla en agua. Se puede ver que parece quebrarse bajo la superficie. En realidad lo que sucede es que la luz reflejada por la varilla (su imagen) cambia de dirección al salir del agua, debido a la diferencia de índices de refracción entre el agua y el aire.

Se utiliza la letra "n" para representar el índice de refracción del material, y se calcula por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{c}{v}$$

donde: n: índice de refracción del medio en cuestión
 c: velocidad de la luz en el vacío e igual a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 v: velocidad de la luz en el medio en cuestión.

Es decir que es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz que tenga en el medio en cuestión, por ejemplo el núcleo o el manto..

Dado que la velocidad de la luz en cualquier medio es siempre menor que en el vacío, el índice de refracción será un número siempre mayor que 1. En el vacío : $n=1$.

El índice de refracción, entonces, dependerá del tipo de material por donde se propagará la luz. Como referencia tenemos los siguientes índices de refracción:

Material	n
----------	---

Vacío.....	1
Aire.....	1,0002
Vidrio.....	1,4
Agua.....	1,34

Puesto que el vacío es el medio menos denso y donde la luz se propaga más rápidamente, el índice de refracción no puede ser menor de 1 y pocas veces mayor de 2.

La forma común de expresar el índice de refracción es estableciendo la densidad relativa de un medio con respecto al otro, como veíamos en la fórmula de la ley de Snell, es decir el índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción.

2.1.5.5 Reflexión Total Interna (R.T.I)

Para que todos los haces de luz se mantengan dentro del núcleo de la fibra debe darse la reflexión total interna, esta condición se cumple par una valor máximo del ángulo de incidencia conocido como *ángulo crítico* y es aquel que le corresponde un ángulo de refracción de 90°, el cual depende del tipo del material donde se propague la luz, como se indica en el siguiente ejemplo.

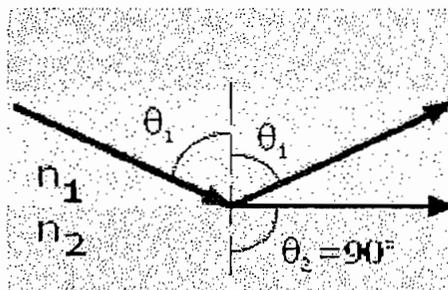
Ejemplo:

$$n_1=1.5 \quad n_2=1.3$$

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

$$1.5 \cdot \text{sen } \theta_1 = 1.3 \cdot \text{sen } 90^\circ \quad (\text{sen } 90^\circ = 1)$$

$$\text{sen } \theta_1 = 1.3 / 1.5 \Rightarrow \theta_1 \geq 60^\circ$$



2.1.5.6 Apertura Numérica (AN)

Es un indicador del ángulo máximo con que un haz de luz puede ingresar a la fibra para que se produzca la reflexión total interna.

La apertura numérica es un valor que da idea del cono de aceptación de luz de la fibra óptica. Cuando menor sea AN mayor debe ser la direccionalidad de la fuente de luz.

Son valores comunes de AN entre 0.11 para fibra óptica monomodo y 0.20 para fibra óptica multimodo, las cuales se detallarán en la clasificación de la fibra.

Los rayos de luz que estén dentro del cono de aceptación, son los que se van a propagar por el núcleo de la fibra óptica los otros rayos se perderán, como se puede observar en la figura 2.9.

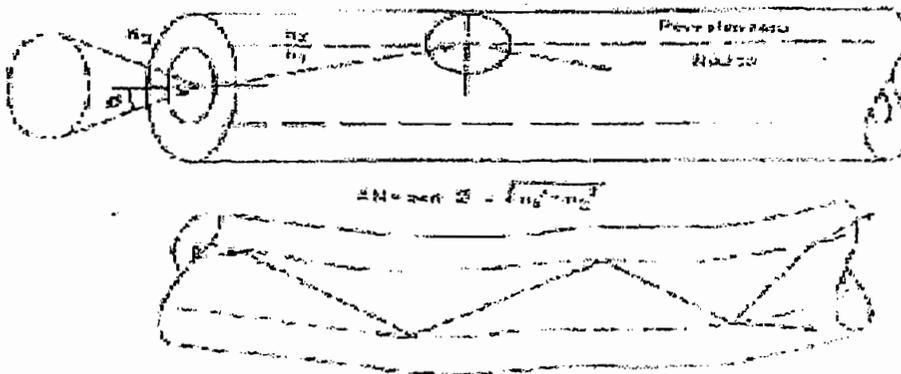


Figura 2.9

El ángulo que forma el haz de luz que ingresa a la fibra óptica con la normal a la superficie de ingreso tiene un valor máximo, para no obtener refracción. este máximo valor se conoce como *ángulo de aceptación*, y su seno es la apertura numérica.

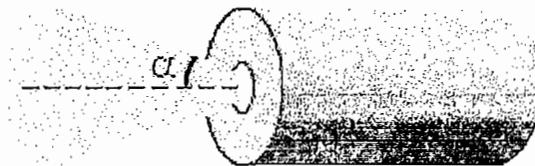
La Apertura Numérica está expresada en función de los índices de refracción n_1 y n_2 , del núcleo y del manto respectivamente. Además tiene relación con el ángulo de aceptación, de la siguiente manera:.

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{y} \quad AN = \text{sen } \alpha \quad \text{siendo el medio externo aire o vacío}$$

Donde: n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y el manto respectivamente.

y α es el ángulo de aceptación.

Entonces, a mayor AN, mayor es el ángulo de aceptación.



Cono de aceptación

2.1.5.7 Grado de Desplazamiento del Rayo Refractado

La mayor o menor desviación, con respecto a la normal, que sufre el rayo incidente al pasar de un medio a otro depende de:

- La densidad relativa de los dos medios. Cuanto mayor sea la diferencia de densidad mayor será el grado de desviación.
- Del ángulo de incidencia
- De la longitud de onda del rayo incidente.

2.1.6 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Podemos clasificar a las fibras ópticas principalmente de dos maneras: por la variación del índice de Refracción y dependiendo del uso de la fibra óptica.

2.1.6.1 Por la Variación del Índice de Refracción

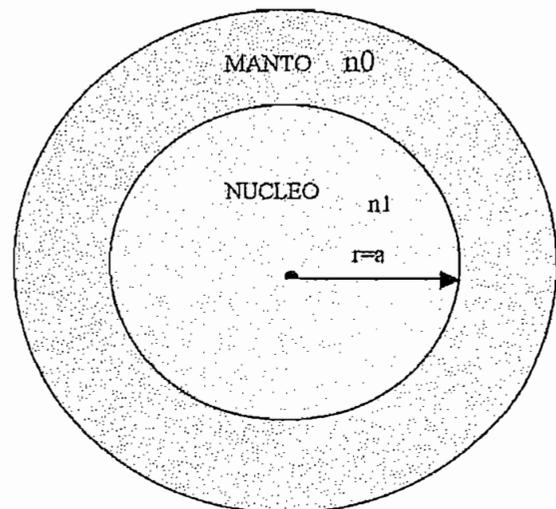
Para entender los tipos de fibra, por la variación del índice de refracción, es necesario conocer el concepto de modo de propagación. La radiación emitida, por muchos motivos, obvios, se propaga por distintas trayectorias en el interior de la guía. Estos posibles caminos son llamados modos.

Normalmente en las fibras ópticas existe un decrecimiento del índice de refracción a lo largo del radio del núcleo y esta variación está representada por $n(r)$, a éste término se denomina como *perfil del índice de refracción*, presentándose un máximo índice de refracción en el centro del núcleo, denominado n_1 , y tendiendo a un mínimo en el revestimiento o manto, n_0 . El índice de refracción que varía en función del radio se lo puede expresar de la siguiente manera:

$$n^2(r) = n_1^2 [1 - 2 * \Delta * f(r)]$$

donde la función $f(r)$ es tal que:

$$f(r) = \begin{cases} 0 & \text{si } r=0 \\ 1 & \text{si } r=a \\ kte & \text{para } r>a \end{cases}$$



Δ es la diferencia relativa entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, el cual está representado por la siguiente relación:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2 * n_1^2} = \frac{AN^2}{2 * n_1^2}$$

una aproximación de esta fórmula es:

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_0}{n_1}$$

Generalmente esta diferencia relativa es un valor mucho menor que la unidad, típicamente está entre:

$$0.1\% \leq \Delta \leq 1\%$$

La propagación de los modos en el conductor de fibra óptica depende de la forma de este perfil de índices de refracción. En la figura 2.10 se observan algunos ejemplos de perfiles.

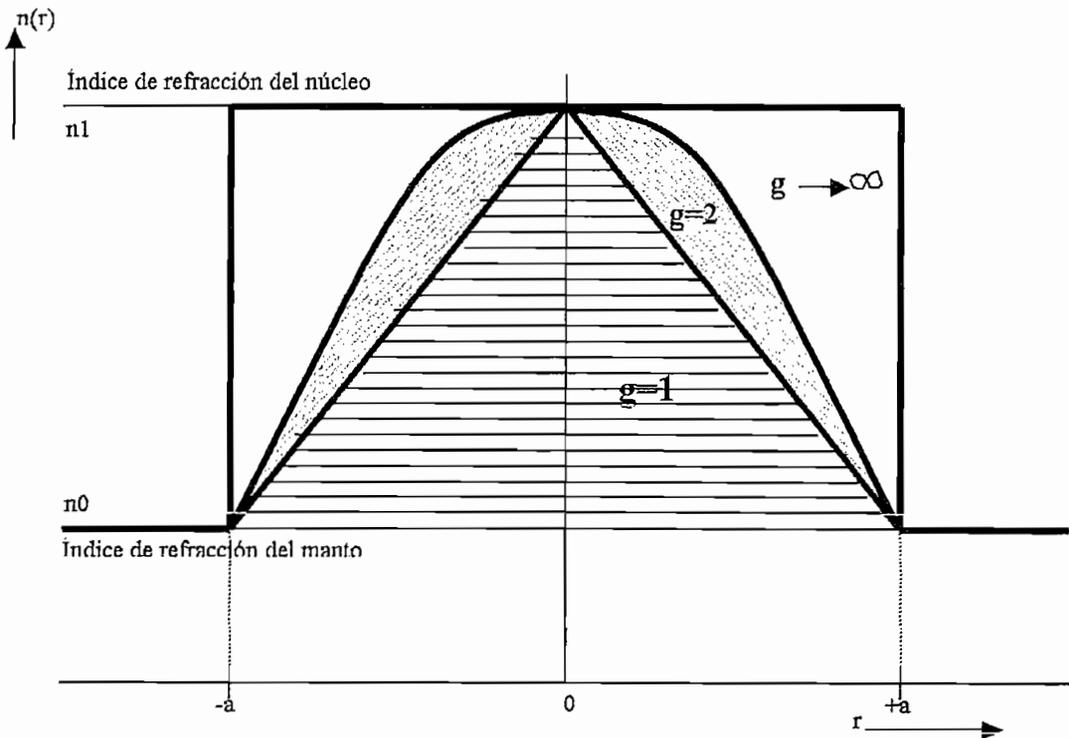


Figura 2.10 Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica

En la práctica interesan los *perfiles exponenciales*, en los cuales se tiene que:

$$f(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^g$$

Es decir estos perfiles presentan una variación que es función exponencial del radio, entonces se obtendrá:

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2 * \Delta * \left(\frac{r}{a}\right)^g \right] \quad \text{para } r < a \text{ en el núcleo}$$

$$\text{y } n^2(r) = n_0^2 = kte \quad \text{para } r \geq a \text{ en el manto}$$

donde:

n_1 : índice de refracción en el eje del conductor de fibra óptica ($r=0$)

Δ : diferencia normalizada de índices de refracción

r : distancia del eje del conductor de fibra óptica, en μm

a : radio del núcleo, en μm

g : exponente, llamado también *exponente del perfil*

n_0 : índice de refracción del revestimiento.

En la figura 2.10 se muestran los siguientes casos especiales de perfiles:

$g=1$: perfil triangular

$g=2$: perfil parabólico o perfil gradual

$g \rightarrow \infty$: perfil escalonado (caso límite)

Entonces en función de la variación del índice de refracción en el núcleo se tiene las siguientes clases de fibra óptica:

2.1.6.1.1 Fibra óptica con Índice de Refracción Escalonado (SI: Stop Index)

Esta fibra óptica presenta un perfil escalonado, en el cual el índice de refracción es constante en el núcleo.

Las Fibras con índice escalonado pueden ser de dos tipos:

- **Multimodo (MM,SI):** En este tipo de fibra viajan varios rayos ópticos reflejándose a diferentes ángulos, esto se da debido a que el diámetro del núcleo es de cientos de micrómetros (10^{-6} m), la luz se refleja en la frontera núcleo-manto para producir múltiples trayectorias de diferente longitud, y retardos un poco diferentes, como se muestra en la figura 2.11. Provoca dispersión o expansión del pulso transmitido, lo que limita la tasa de transmisión que se puede alcanzar.

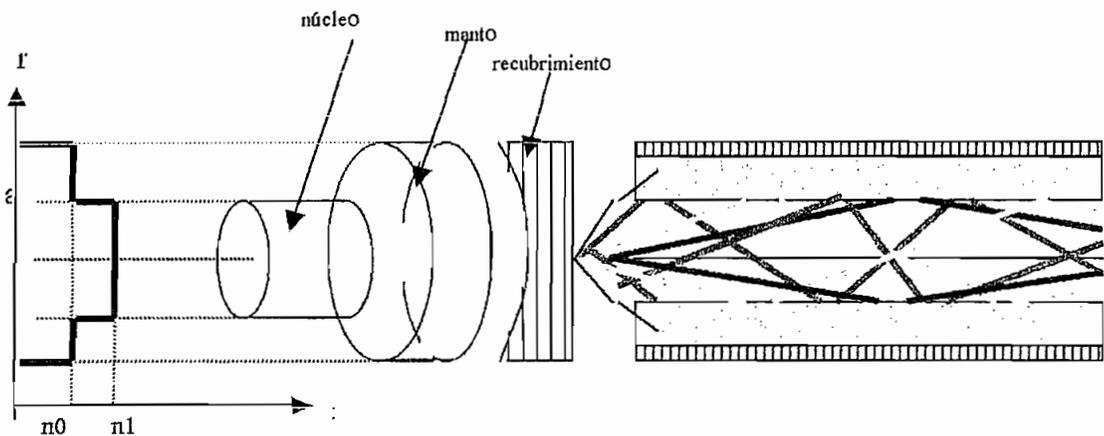


Figura 2.11 Fibra Multimodo de Índice en Escalón

- **Monomodo (SM,SI):** : El diámetro del núcleo en esta fibra es más pequeño (pocos micrómetros) que la fibra multimodo de índice escalonado y por esta razón permite un solo modo de propagación, es decir permite viajar solamente al rayo óptico central, se obtiene menor dispersión de luz, y mayores tasas de transmisión posibles. Es la que ofrece mayor rendimiento, siendo más difícil de fabricar, y consecuentemente, más cara. En la figura 2.12 se puede observar que el diámetro del núcleo es mucho menor que la fibra óptica anteriormente nombrada.

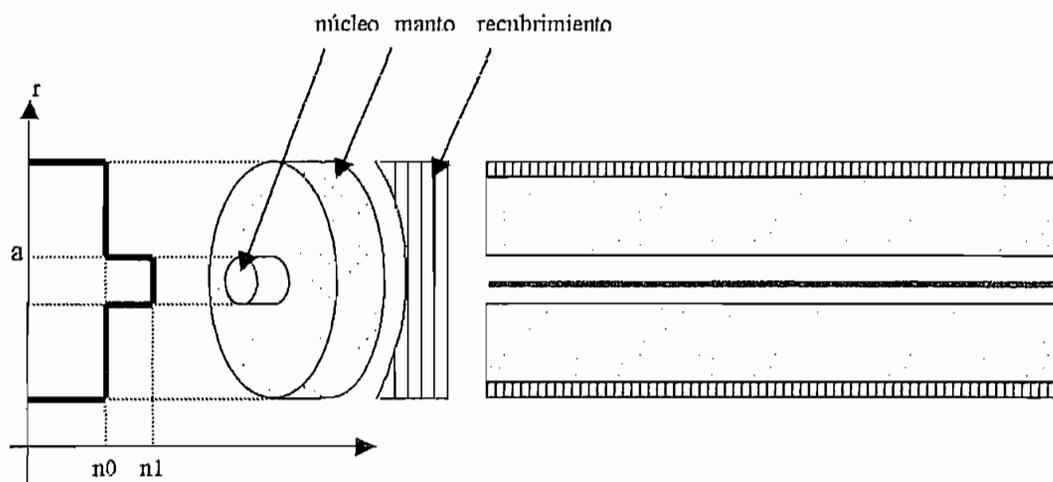


Figura 2.12 Fibra Monomodo de Índice Escalonado

2.1.6.1.2 *Fibra Óptica con Índice de Refracción Gradual (MM,GI)*

Todas las fibra ópticas de Índice Gradual son multimodales, y generalmente se usan las que tienen un *perfil parabólico* (con $g=2$), en las cuales el índice de refracción $n(r)$ en el núcleo se incrementa en forma parabólica desde el valor n_0 en el manto hasta el n_1 en el eje del conductor de la fibra óptica. En este tipo de fibra óptica el núcleo está hecho de varias capas concéntricas de material óptico con diferentes índices de refracción. El índice de refracción varía como función de la distancia radial desde el centro de la fibra La propagación de los rayos en este caso siguen un patrón similar mostrado en la figura 2.13.

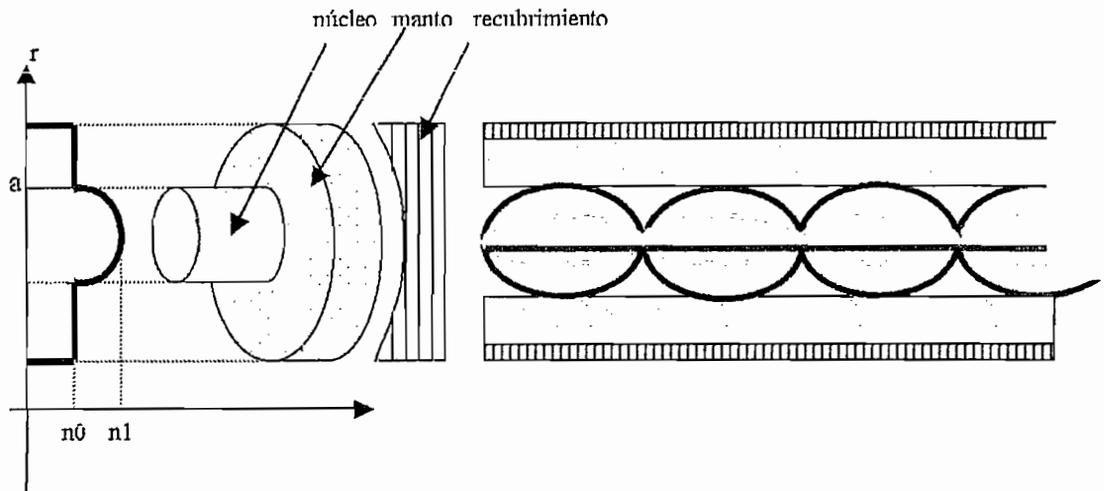


Figura 2.13 Fibra Multimodo de Índice Gradual

2.1.6.2 Por su Aplicación

Dependiendo del uso de la fibra óptica, se pueden tener dos tipos: fibra óptica de alta calidad y fibra para enlaces de corta y mediana distancia.

Las fibras ópticas de alta calidad y gran capacidad son generalmente utilizadas en Enlaces de Telecomunicaciones. Como ejemplo se menciona a continuación las especificaciones técnicas de fibras multimodo de alta calidad. Ver Tabla 2.1.

Parámetro	Valores Típicos
Diámetro del núcleo (μm)	62.5 ± 3
Diámetro de la superficie del manto (μm)	125 ± 3
Error de concentricidad (núcleo-manto)	$\approx 6\%$
No circularidad	$\approx 6\%$ (núcleo); $\approx 2\%$ (manto)
Apertura numérica teórica máxima	$0.18 - 0.23$ ($\lambda = 850nm$) $0.15 - 0.2$ ($\lambda = 1300nm$) $0.1 - 0.2$ ($\lambda = 1550nm$)
Coefficiente de atenuación (dB/Km)	$2.5 - 4$ (850nm) $0.8 - 3$ (1300nm) < 0.2 (1550nm)
Ancho de banda Intermodal ¹⁶ o Factor de Mérito (MHz*Km)	$200 - 1000$ (850nm) $200 - 1200$ (1300nm) $500 - 1500$ (1500nm)
Dispersión del material ¹⁷ (ps/km*nm)	≈ 100 (850nm) ≈ 6 (1300nm) ≈ 3 (1550nm)

Tabla 2.1 Especificaciones de fibra multimodo de alta calidad

En las fibras para enlace de corta y media distancia, lo más frecuente es que las fibras sean de vidrio, o al menos con núcleo de vidrio. También se encuentran de plástico, pero éstas presentan mayores atenuaciones y se aplican sobre distancias de pocos metros (como por ejemplo en aplicaciones de medicina, automóviles, instrumentación, etc)

¹⁶ El Ancho de banda intermodal es un factor de indicación del ancho de banda que se puede tener por cada kilómetro de la fibra utilizada.

¹⁷ La dispersión material es función de la frecuencia y que produce un ensanchamiento en el pulso transmitido, este término se detallará más adelante.

En general, las fibras con núcleo policomponente, dentro de cualquiera de los dos tipos indicados se distinguen fibras monomodo y multimodo, estas últimas de índice gradual. Por su mayor ancho de banda, las fibras monomodo se aplican en enlaces de larga distancia y gran flujo de información: cables submarinos, enlaces interurbanos a 140 Mbps o velocidades superiores, etc.

Las fibras ópticas multimodo de alta calidad se usaron con anterioridad a las monomodo, con aplicación en enlaces telefónicos, principalmente en las redes urbanas a velocidades de 34 y 140 Mbps. Para estas aplicaciones eran suficientes fibras con factores de mérito¹⁸ inferiores a 1000 MHz*Km, se tienen de índice gradual y escalonado; las primeras son idóneas para redes de distribución de TV o redes multiservicio en áreas de abandono donde son suficientes anchuras de 100 a 200 MHz*Km.

2.1.6.2.1 *Fibras de Alta Calidad*

FIBRAS MULTIMODO

El núcleo y el manto son de sílice, pero el núcleo está dopado de tal forma que el índice de refracción presenta una forma casi parabólica. Por la apertura numérica teórica máxima se espera que oscile entre 0.18 y 0.23 para fibras trabajando en región de 850 nm, entre 0.15 y 0.20 para fibras usadas con transmisiones ópticas en la región de 1300 nm y entre 0.1 – 0.2, trabajando con longitud de onda de 1550 nm. En cualquier caso, el valor nominal no suele diferir en más del 0.02 del valor real.

Las características de transmisión dependen de la longitud de onda, como se puede verificar en los valores de coeficiente de atenuación para las tres ventanas de transmisión, indicadas en la tabla 2.1.

¹⁸ El parámetro ancho de banda por cada kilómetro de distancia (dB*Km), también conocido como factor de mérito, es aquel indicador de la capacidad de transmisión de la fibra óptica por cada kilómetro de distancia.

FIBRAS MONOMODO

Los cables de fibras monomodo se utilizan ya con preferencia a las multimodo en las redes de telecomunicación. Las aplicaciones previstas pueden exigir varios tipos de fibras monomodo que difieran en:

La naturaleza del perfil del índice de refracción

La longitud de onda del funcionamiento

Las características geométricas y ópticas.

Para materializar una fibra monomodo pueden adaptarse muy diversos configuraciones de perfil de índice de refracción.

Lo mismo que en el caso anterior, la especificación de los largos de fabricación de cable se refiere únicamente a los parámetros de transmisión ya que las características ópticas y geométricas no son afectadas por el proceso de cableado.

Actualmente se trabaja con longitudes de onda de 1300 nm y 1550 nm, por las características de transmisión que se presenta en esta dos ventanas.

2.1.6.2.2 *Fibras para Enlaces de corta y media distancia*

Es posible clasificarlas en función de dos grandes bloques de aplicaciones:

Fibras para redes de abonados de banda ancha.- Sería posible usar fibras con diámetros de núcleo y aperturas numéricas mayores, por ejemplo de 65/125¹⁹ um o incluso de 100/140 um. Al incrementar el diámetro del núcleo y la apertura numérica se logra una ventaja doble: las herramientas y métodos de conexión se simplifican y las pérdidas de acoplamiento entre la fuente óptica y la fibra óptica se reducen.

¹⁹ 65/125 um se refiere a la relación entre el diámetro del núcleo y el diámetro del revestimiento

Fibras para cortas distancia y pequeña capacidad.- Son fibras con diámetro de núcleo y revestimiento relativamente altos y son muy útiles en aplicaciones para redes locales, en oficinas, enlaces entre ordenadores, telecontrol, y telemedida, etc. En general en todas aquellas aplicaciones donde el producto ancho de banda *distancia que necesita esta entre los 5 y 40 MHz Km.

2.1.7 FABRICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

El material utilizado para fabricar fibras ópticas es principalmente el dióxido de silicio, cuarzo o sílice.

Durante el proceso de fabricación se incorporan al dióxido de silicio los aditivos de dopado. Estos son utilizados para modificar el valor de los índices de refracción del núcleo y del manto de la fibra óptica.

El dióxido de silicio en el núcleo de la fibra está dopado con aditivos de boro y flúor para aumentar el valor del índice de refracción.

En el manto, el dióxido de silicio esta dopado con aditivos de germanio y fósforo para disminuir el valor del índice de refracción.

Para la fabricación de las fibras ópticas se requieren materiales de muy alta transparencia óptica, por lo que el dióxido de silicio utilizado se ha de obtener en un estado de muy alta pureza.

Los 2 tipos de guías ópticas: de índice escalonado y de índice gradual, sea multimodo o monomodo, son fabricados de maneras distintas. Existen métodos directos y métodos de deposición.

Los métodos directos son:

El método del doble crisol.

El método del alambre en el tubo.

Los métodos de deposición son:

Deposición química de vapor modificada (MCVD)

Deposición química de vapor modificada con plasma (PMCV).

Deposición de vapor exterior (OVD).

Deposición de vapor axial (AVD).

Estos métodos de deposición producen preforma (1 m de largo y 2 cm de diámetro), lo que esta a un solo paso de ser fibra. Como se indica a continuación.



2.1.7.1 Métodos Directos

2.1.7.1.1 Método del Doble Crisol

El vidrio fundido del núcleo se mete en el crisol interior, y el del manto en el exterior, como se indica en la figura 2.14.

Los dos vidrios salen juntos en la base del crisol exterior y una fibra es sacada.

Con este método se pueden obtener fibras muy largas.

Así se pueden fabricar fibras de índice escalón y graduado.

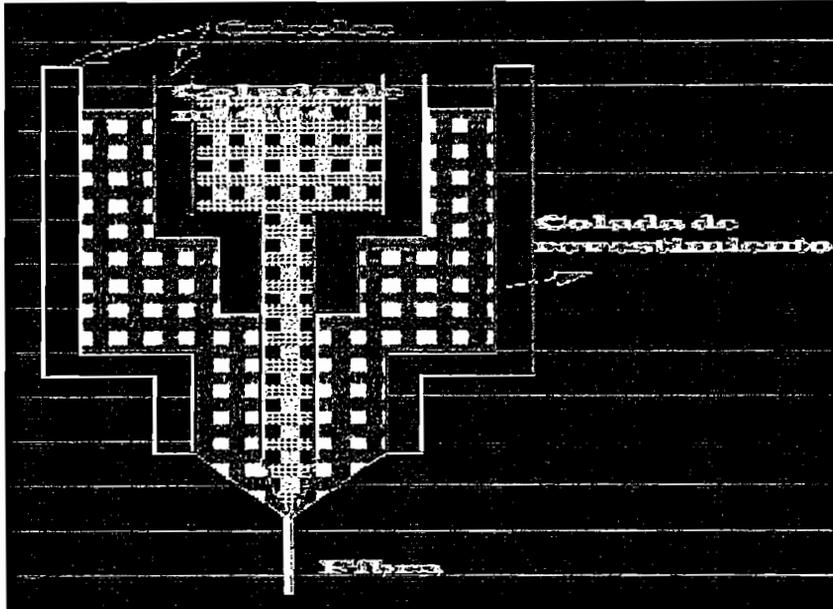


Figura 2.14 Método del Doble Crisol

2.1.7.1.2 Método del Alambre en el tubo

Un alambre de vidrio de núcleo es metido dentro del tubo de vidrio del revestimiento, como se puede ver en la figura 2.15.

El final de este ensamble es calentado, el vidrio es suavizado y la fibra es sacada.

El tubo y el alambre tienen un metro de largo y el alambre del núcleo tiene 30 mm de diámetro.

Los dos vidrios deben tener temperaturas de ablandamiento similares.

Este método es muy simple, solo hay que comprar el alambre y el tubo, y tener mucho cuidado de no introducir impurezas.

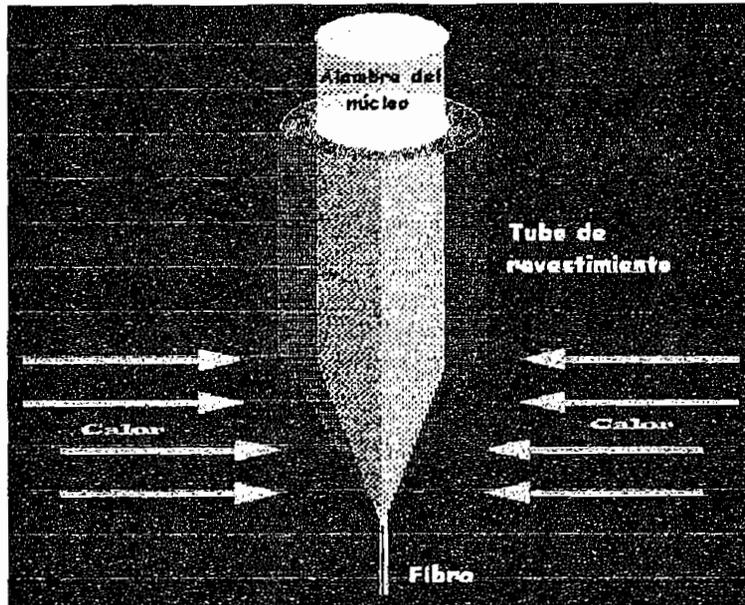


Figura 2.15 Método del alambre en el tubo

Como ejemplo se puede mencionar a continuación la obtención de la fibra óptica de índice escalonado usando el método del doble crisol.

Alambres de vidrio que contienen vidrio de núcleo y revestimiento de la fibra eventual son alimentados en dos crisoles de platino concéntricos, los cuales son calentados en un horno de forro de silicio. Las dos composiciones se funden bajo una atmósfera inerte y fluyen a través de un orificio como un compuesto, en una corriente concéntrica, el diámetro del cual es monitoreado por un scanner.

Después pasa por recubrimientos de polímeros, luego por hornos primarios y secundarios, los cuales vulcanizan los recubrimientos mediante energía termal o ultravioleta, la fibra solidificada es enrollada alrededor de un cobrestante y sobre un carrete de recuperación. Como se puede ver en la figura 2.16.

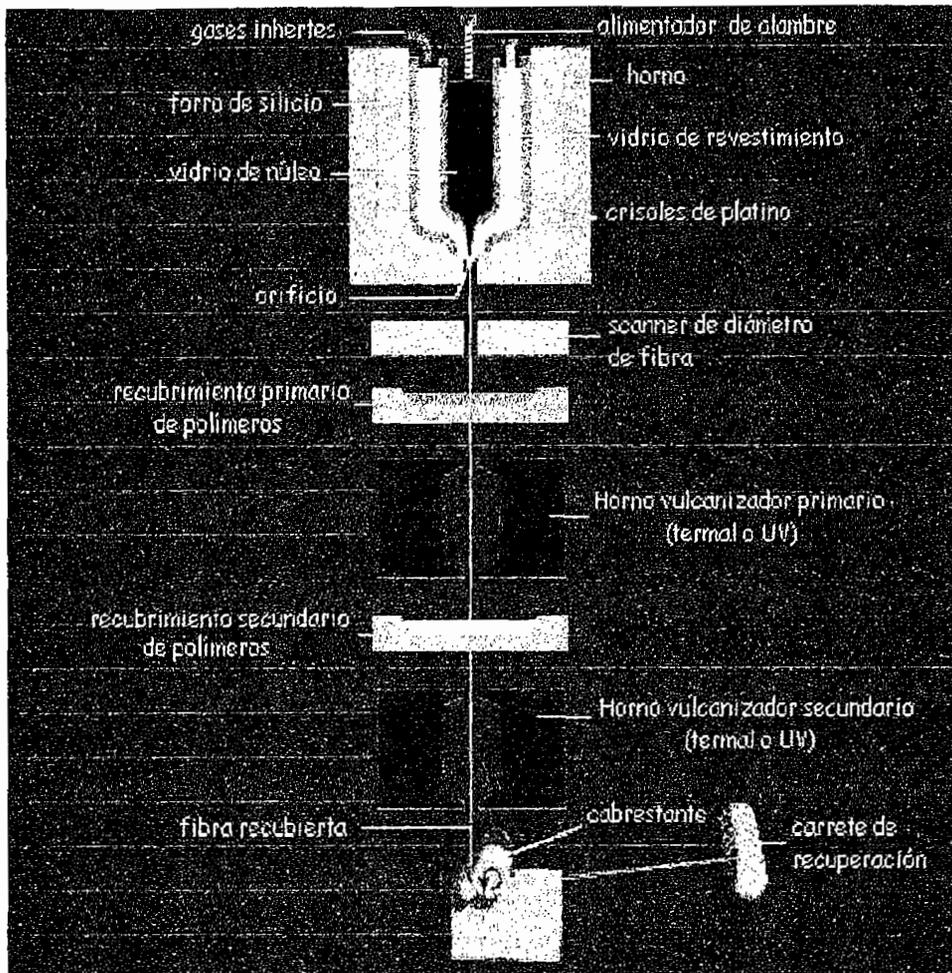


Figura 2.16 Obtención de fibra con índice en escalón

2.1.7.2 Métodos de Deposición

2.1.7.2.1 Deposición química de vapor modificada (MCVD)

Los químicos son mezclados en un tubo que esta rotando en un torno.

Estos químicos reaccionan y partículas extremadamente pequeñas de germano y vidrio de silicato de fósforo son depositados en el interior del tubo.

Un quemador que se mueve a lo largo del tubo causa la reacción y luego funde el material depositado, ver figura 2.17.

El preformado es depositado capa por capa, partiendo por el revestimiento y de ahí el núcleo.

Al variar la mezcla de los químicos varia el índice de refracción de la fibra.

Cuando la deposición es terminada, el tubo es colapsado a 2000 °C en una preforma de el silicio mas puro con un núcleo de diferente composición.

La preforma es puesta después en un horno para ser secada

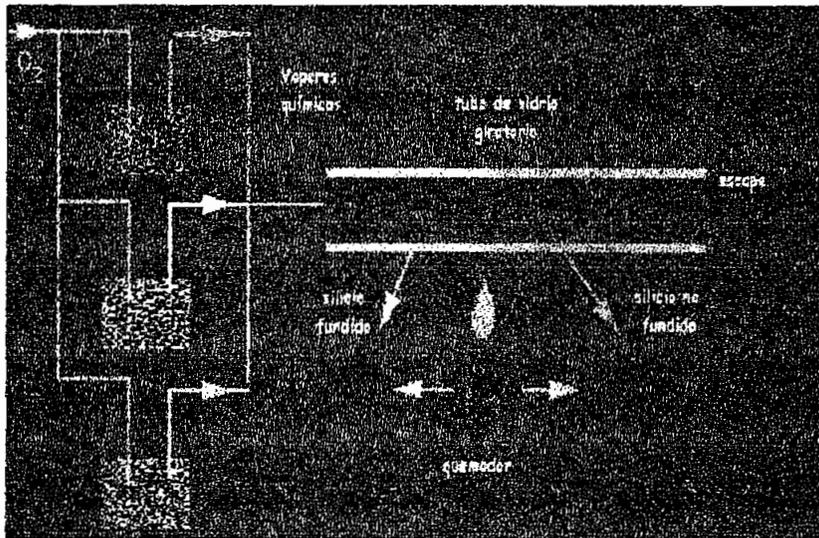


Figura 2.17 Método del deposición química de vapor modificado

2.1.7.2.2 Deposición química de vapor con plasma modificada (PMCV)

Se diferencia del MCVD en que usa plasma en vez de un quemador.

El plasma es una región de gases ionizados y calentados eléctricamente. Esto provee suficiente calor para incrementar los índices de reacción de los químicos dentro del tubo y los índices de deposición.

Esta técnica es usada para hacer fibras muy largas (50 km.). Como se indica en la Figura 2.18.

De aquí se obtienen fibras de índice escalón y graduado.

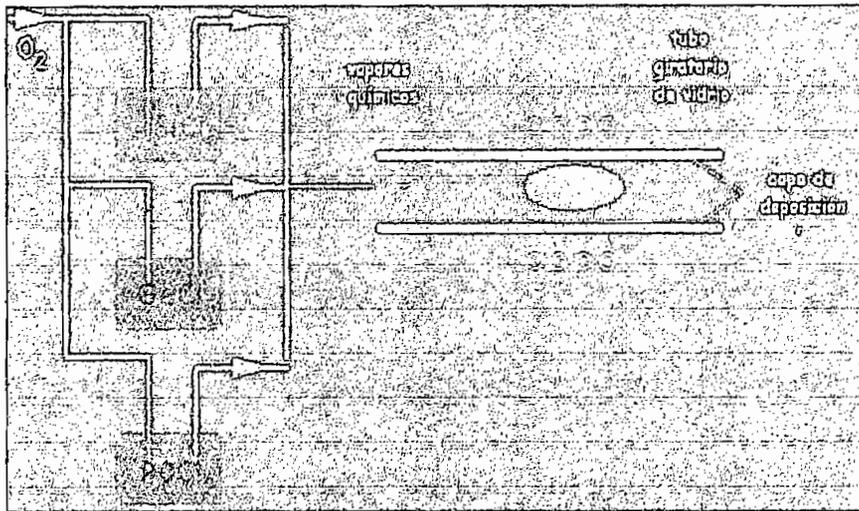


Figura 2.18 Método PMCVD

2.1.7.2.3 Deposición de vapor exterior (OVD)

Los vapores químicos son oxidados en la flama por hidrólisis. La deposición es hecha en el exterior de un alambre de silicio mientras el quemador se mueve lateralmente. Cuando la deposición es terminada, el alambre es removido y el tubo resultante es colapsado térmicamente. El proceso se puede apreciar en la figura 2.19.

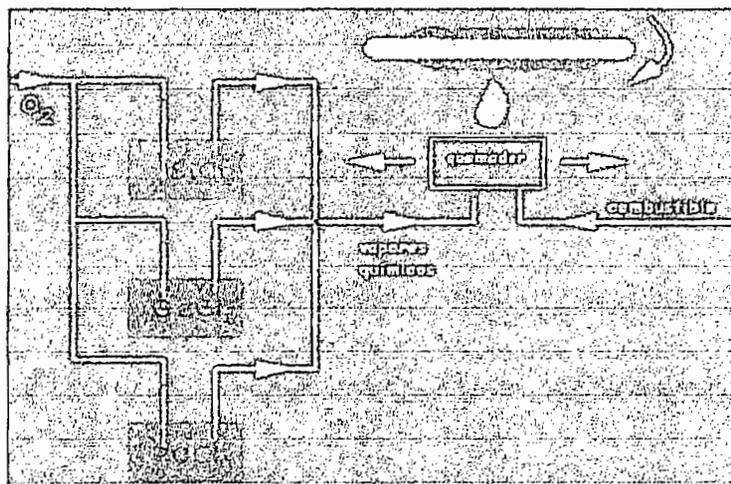


Figura 2.19 Método OVD

2.1.7.2.4 Deposición de vapor axial (AVD)

La deposición ocurre al final, en un depósito giratorio que contiene silicio mientras es calentado por un quemador, ver figura 2.20.

Preformas de núcleo y fibras muy largas se hacen por esta técnica.

De aquí se obtienen fibras de índice de escalón y graduado.

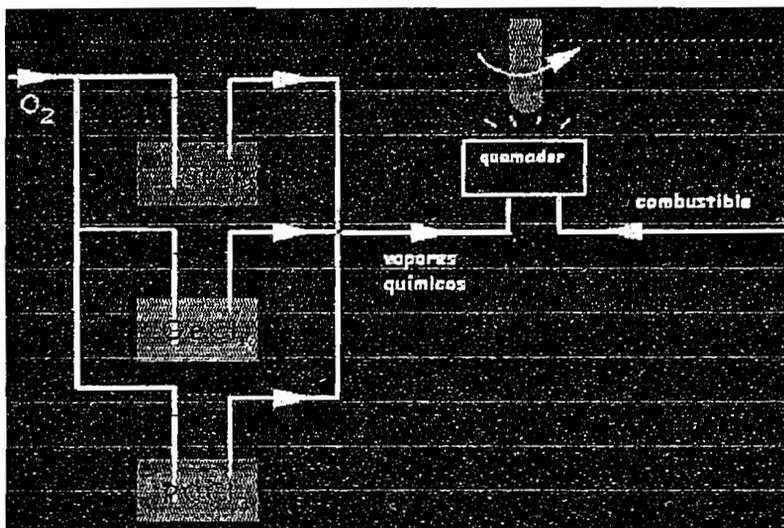


Figura 2.20 Método AVD

La preparación de la fibra óptica de índice graduado, mediante el método MCVD, se tienen la ilustración de la figura 2.21.

El Oxígeno es burbujeado con tetracloruro de silicio ($SiCl_4$), tricloruro de fósforo ($POCl_3$), y tetracloruro de germanio ($GeCl_4$). Los vapores resultantes son mezclados en proporciones adecuadas en un controlador de flujo y alimentados dentro de un tubo de silicio. El calor generado por el quemador de hidrogeno y oxígeno, inicia una reacción en fase vapor en el cual un hollín, que contiene silicio así como óxidos de fósforo y germanio, es depositado en una serie de capas porosas en el interior del tubo. Las capas son deshidratadas por oxiclورو de azufre gaseoso ($SOCl_2$) y varios productos de deshecho son ventilados a través

del escape de gases. Las capas son aglomeradas después, colapsadas en vacío, y condensadas en capas de núcleo y revestimiento concéntricas con las propiedades refractarias deseadas.

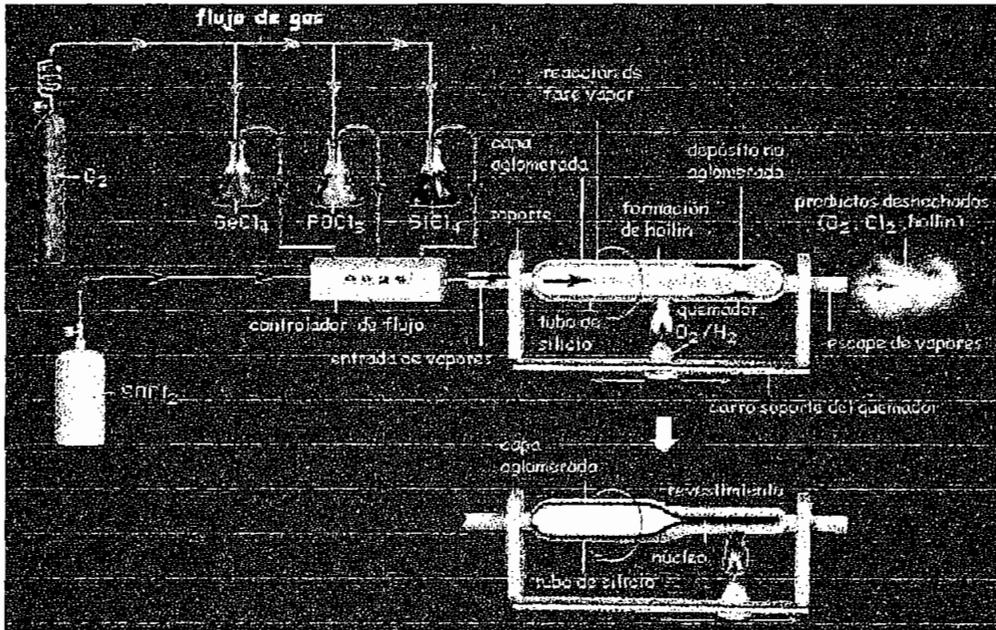


Figura 2.21 Preparación de fibra con índice gradual usando MCVD

2.1.7.3 Secado y enrollado de la fibra desde la preforma

Luego de la fabricación de la preforma por cualquiera de los métodos indicados anteriormente, se realiza el último proceso para la obtención de fibra óptica que es el de sacado y enrollado de la misma, como se indica a continuación y con la ayuda de la figura 2.22.

La punta de la preforma es calentada a 2000 °C en un horno. A medida que el vidrio se ablanda, un fino cordón de vidrio ablandado cae por gravedad y se enfría.

A medida que la fibra es sacada, su diámetro es monitoreado todo el tiempo.

De ahí se le aplica un recubrimiento plástico antes de que toque cualquier otro componente. El recubrimiento plástico la protege del polvo y la humedad.

Posteriormente la fibra es enrollada en un carrete.

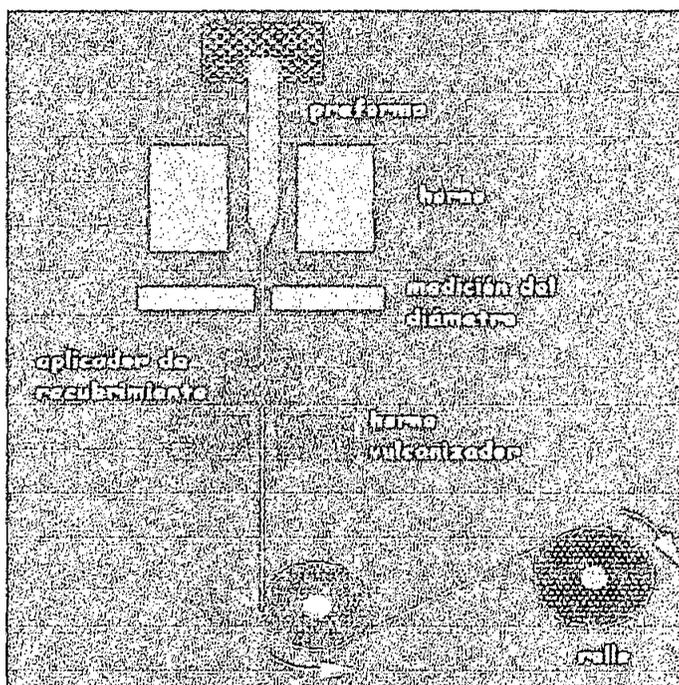


Figura 2.22 Proceso de sacado y enrollado de la fibra

2.1.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FIBRA ÓPTICA COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN

2.1.8.2 Ventajas

Las ventajas derivadas de la utilización de las fibras ópticas son las siguientes:

Gran Ancho de banda

Debido a que la portadora de la información es la luz ($AB - 10^{12} Hz$), es posible transmitir a cientos de GHz ($10^9 Hz$), por una sola fibra óptica.

Las fibras ópticas presentan anchos de banda desde los 10 MHz x km, pudiendo llegar hasta los 1500 GHz x km.

Los cables ópticos son capaces de presentar una capacidad de transmisión superior en 500 veces a la capacidad de transmisión de sus homónimos coaxiales.

Como ejemplo, sirve citar el que se puedan llegar a establecer por una sola fibra óptica hasta 2600 comunicaciones simultáneas.

Baja Atenuación

La atenuación depende del tipo de medio de transmisión y a su vez dependiendo de la longitud de onda o más concretamente de la frecuencia se tiene diferente atenuación, como se puede observar en el gráfico atenuación vs longitud de onda de la figura 2.1.

Con los bajos valores de atenuación que se consiguen actualmente en las fibras ópticas (monomodo del orden de 0,2dB) se logra aumentar la distancia entre repetidores, llegándose a cubrir más de 50 km.

Inmunidad electromagnética

La fibra óptica está construida con materiales dieléctricos, y por tanto no se ve afectada por los campos electromagnéticos.

Es inmune a la radiación electromagnética recibida. No constituye fuente de radiación electromagnética al no emitir radiación alguna, por lo que se convierte en el medio ideal de transporte cuando nos encontramos en medios con fuertes campos electromagnéticos, como pueden ser las líneas de transporte de energía de alta tensión o guerra electrónica, por lo que tiene un gran número de aplicaciones en Aviación militar.

Reducción de tamaño

La utilización de las fibras ópticas conlleva una reducción del tamaño de los cables, comparativamente hablando, con respecto a las capacidades de transporte equivalentes.

Como ejemplo, es importante decir que un cable de 900 pares de cobre, de 80 mm. de diámetro, es equivalente a un cable óptico monofibra de 4 mm. de diámetro.

Bajo peso

Como las fibras ópticas pesan menos que los conductores de cobre, representan una ventaja añadida en todas aquellas aplicaciones donde es determinante el peso, como es la industria aeronáutica o espacial.

Alta seguridad o inviolabilidad

Es prácticamente imposible acceder a la información que se propaga por una fibra óptica sin afectar a los niveles de potencia lumínica, y por lo tanto a la transmisión, lo que garantiza una gran seguridad en la transmisión de la información.

Por otra parte, al no irradiar energía alguna, la aplicación de cualquier otra técnica de escucha es inútil, lo que las hace prácticamente inviolables.

Aislamiento eléctrico

Al estar construidas con elementos dieléctricos, pueden ser usadas en ambientes peligrosos y donde su característica dieléctrica garantice un comportamiento eléctrico aislante al no existir la posibilidad de generación o de propagación de carga eléctrica alguna que pueda generar chispas eléctricas.

Rentabilidad

Desde el punto de vista de los costos, económicamente hablando, la fibra óptica es especialmente más rentable en la red interurbana frente a los cables coaxiales, al presentar un menor precio por sección.

Este factor, añadido a que las secciones de regeneración son mayores en las redes de fibra óptica que en las redes de cables coaxiales, provoca una nueva reducción en los costos, al eliminar una gran parte de los regeneradores intermedios, necesarios en los equipos de línea de los cables coaxiales.

Respecto a los valores de tendido y mantenimiento de ambas redes, son prácticamente iguales. Se llega a dar el caso, en los tendidos aéreos con cables autosoportados, que los costos de los mismos son netamente inferiores a los de sus similares de cobre.

Otra ventaja añadida a la utilización de fibras ópticas, frente al conductor coaxial, la constituye la posibilidad de migrar en el futuro a unas mayores velocidades de transmisión, por ser capaz el medio de soportarlas con el consiguiente aumento en la rentabilidad de la red.

Todos estos factores son determinantes en la mayor rentabilidad de las redes de fibra óptica frente a las redes de cable coaxial, en una escala del 1 a 10, los costos relativos por una red interurbana de cable coaxial, con una velocidad de transmisión en ambas redes de 565 Mbps.

En los precios unitarios se encuentran incluidos los totales de los equipos de transmisión respectivos para cada técnica.

En el caso de las redes urbanas, en las que los conductores de cobre utilizados son cables coaxiales o cables de pares de cobre capaces de velocidades de hasta 2 Mbps, la utilización de la fibra óptica sigue siendo rentable frente al cable de pares de cobre.

2.1.8.3 Desventajas

Temperatura

Las fibras ópticas, pueden ser utilizadas con garantías en el rango de temperaturas de -10°C hasta 50°C

Tecnología

La alta tecnología usada tanto para los equipos de montaje, instalación y comprobación de líneas y tendidos de fibra óptica, así como la sofisticación de los mismos, hace que estos equipos tengan un valor elevado, factor que sumado a la inercia en la aplicación de los equipos convencionales de cobre totalmente implantados, logra el que muchas empresas por desconocimiento de la tecnología y métodos de trabajo de las fibras ópticas, no se planteen abordar el salto a esta tecnología.

Costo de los equipos

El precio de los equipos de línea para fibra óptica es superior al de sus homónimos de cobre o coaxial, si bien este costo inicial superior se ve compensado por la mayor sección de regeneración que presentan los equipos de transmisión óptica frente a los convencionales de cobre, y por tanto con la necesidad de una menor cantidad de equipos por enlace, lo que se traduce, como ya vimos, en una mayor rentabilidad de los equipos de comunicaciones ópticas.

No obstante, y a pesar de su rentabilidad, el mayor valor unitario de los equipos de la línea ópticos sigue siendo una razón que motiva, cuando no imperan los criterios técnicos, la implantación de los tradicionales equipos de línea en cobre (pares o coaxial).

2.2 PROPAGACIÓN DE LUZ EN FIBRAS ÓPTICAS

La fibra óptica es un medio de transmisión de información analógica o digital en la cual los principios básicos de funcionamiento se justifican de forma clara, aunque poco rigurosa, aplicándole las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra, hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell.

Al resolver las ecuaciones de Maxwell para el interior de la fibra óptica aparecen varias soluciones, llamadas *modos*, cada una correspondiente a una forma diferente de propagación de la onda. Al resolver estas ecuaciones aparece un parámetro V llamado frecuencia de corte normalizada, que relaciona el radio con la longitud de la onda y la apertura numérica, de la siguiente manera:

$$V = 2\pi * \frac{a}{\lambda} * AN = k * a * AN$$

donde: a radio del núcleo

λ longitud de onda

AN apertura numérica

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ constante de propagación

El parámetro V se utiliza para identificar el número posible de modos de transmisión en una guía de ondas, demostrándose que para valores de V inferiores a 2.405 existe un único modo de propagación, llamado HE_{11} , mientras que para valores superiores es posible la existencia de más modos. Para una longitud de onda determinada se pueden combinar diferentes valores de n_1 , n_2 (equivalente a variar la apertura numérica AN) y radio del núcleo para obtener una frecuencia normalizada inferior a 2.405, consiguiéndose varias fibras diferentes con una característica en común: la transición en un sólo modo, denominándose fibras monomodo o *SM (single mode)*.

Las fibras multimodo (MM, *multimode*), son aquellas para las cuales $V > 2.405$, de manera que permiten más de un modo de propagación.

Para un valor determinado de V , inferior a 2.405 existe además una longitud de onda de corte, para la cual un modo establecido deja de ser transmitido, que para las fibras monomodo es la longitud de onda por debajo de la cual la fibra empieza a guiar más de un modo y pierde sus propiedades originales.

El número N de los modos conducidos en el núcleo depende de este parámetro V aproximadamente con la siguiente relación para un perfil de índice de refracción exponencial de exponente g , así:

$$N \approx \frac{V^2}{2} * \frac{g}{g+2} ; \quad \text{para } n(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^g$$

El número de modos para un perfil de índice de refracción escalonado ($g \rightarrow \infty$) es aproximadamente:

$$N \approx \frac{V^2}{2}$$

El número de modos del perfil gradual ($g=2$) es aproximadamente:

$$N \approx \frac{V^2}{4}$$

Entonces un conductor óptico con varios modos de propagación se denomina conductor de fibra óptica multimodo.

Si se desea reducir el número de modos, se debe reducir el diámetro del núcleo ($2a$), la apertura numérica (AN) o aumentar la longitud de onda. De la apertura numérica depende esencialmente cuánta luz se puede acoplar al núcleo del conductor, por lo cual su valor debería ser lo más alto posible. La reducción del

radio del núcleo (a) es posible sólo en forma limitada ya que se podría dificultar el manipuleo de la fibra especialmente para el conexionado.

Por otra parte el incremento de la longitud de onda debe darse de una manera moderada, debido a que se torna más dificultosa la fabricación de emisores y receptores para longitudes de onda más elevadas.

Se tiene que si en un conductor de fibra óptica con un índice de refracción escalonado ($g \rightarrow \infty$) se reduce el parámetro V a valores inferiores a la constante $V_{c\infty} = 2,405$, se puede propagar por el núcleo del conductor un solo modo, el modo fundamental HE_{01} , estos conductores se denominan monomodo.

La constante $V_{c\infty} = 2,405$ representa un valor límite para el conductor de fibra óptica con índice de perfil escaionado, ya que si se sobrepasa de este valor podría conducir más de un modo.

Para una fibra óptica con índice de refracción exponencial $n(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^g$ para cualquier valor de g , se obtiene una aproximación de valor límite del parámetro V , con la siguiente relación:

$$V_c \approx V_{c\infty} * \sqrt{\frac{g+2}{g}}$$

Para un conductor de fibra óptica con índice de refracción gradual ($g=2$), el valor límite de V es aproximadamente:

$$V_c \approx 2,405 * \sqrt{2} = 3,4$$

El valor constante 2,405 se obtiene calculando el valor de x en el primer cero de la función de Bessel de primera clase $J_0(x)$, como se muestra en la figura 2.23. Se toma como referencia la función de Bessel de primera clase ya que su forma es similar a la de las oscilaciones senoidales amortiguadas, dichas funciones son

típicas para el estudio de conductores de ondas con simetría cilíndrica como son el caso de cables coaxiales o los conductores de fibras ópticas.

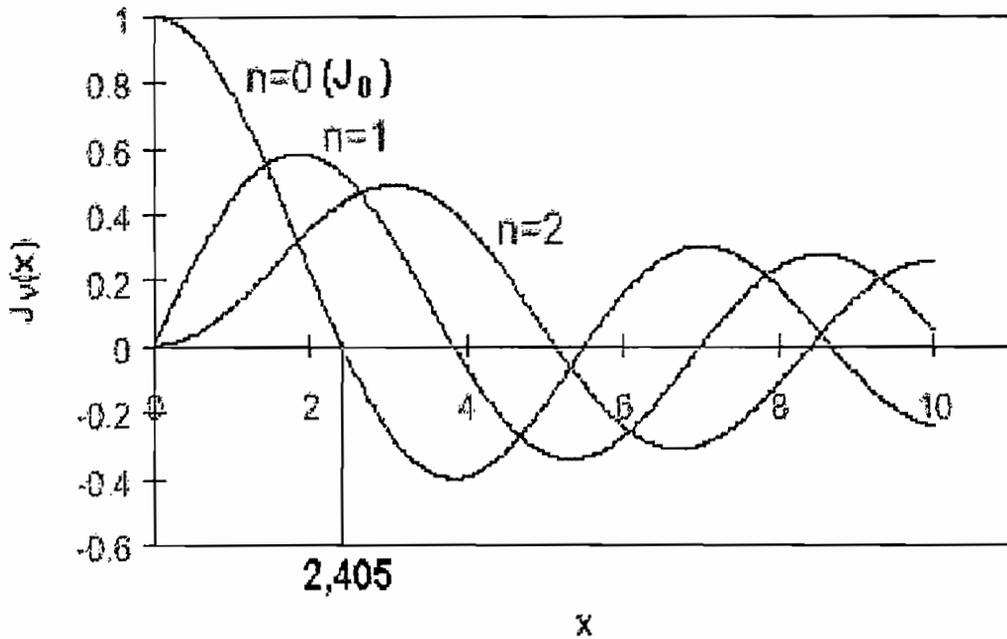


Figura 2.23 Funciones de Bessel

2.2.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Una de las características que limita la capacidad de transmisión de información a través de fibra óptica es el diseño geométrico de la misma.

El diseño geométrico de la fibra usada en un enlace óptico, es regulada por parámetros geométricos que posee la fibra, los cuales se mencionan a continuación:

- Diámetro del núcleo (d_N)
- Diámetro del manto o revestimiento (d_R)
- Excentricidad

- No circularidad del núcleo
- No circularidad del revestimiento

Estas características geométricas se obtienen en los procesos de fabricación de las fibras, dichos parámetros deben cumplir adecuadas tolerancias de error, la magnitud de las tolerancias correspondientes se encuentran en la Recomendación G.651 del CCITT para fibras multimodo y G.652 para fibras monomodo.

Siendo $d_{N\max}$ y $d_{N\min}$ los diámetros máximo y mínimo del núcleo, $d_{R\max}$ y $d_{R\min}$ los diámetros máximo y mínimo del revestimiento, N y R los centros geométricos de núcleo y revestimiento respectivamente, se definen los siguientes parámetros:

Diámetro del núcleo (d_N):

$$d_N = \frac{d_{N\max} + d_{N\min}}{2}$$

Diámetro del revestimiento (d_R):

$$d_R = \frac{d_{R\max} + d_{R\min}}{2}$$

Excentricidad núcleo-revestimiento: C_{N-R}

$$C_{N-R} = \frac{NR}{d_N}$$

No circularidad (elipticidad) del núcleo: N_N

$$N_N = \frac{d_{N\max} - d_{N\min}}{d_N}$$

No circularidad del revestimiento: N_R

$$N_R = \frac{d_{Rmax} - d_{Rmin}}{d_R}$$

En la **tabla 2.2** se muestran las tolerancias admisibles de los parámetros antes mencionados, tanto para fibras monomodo como multimodo.

Parámetro	Fibras monomodo	Fibras multimodo
d_N	< ±10%	< ±6%
d_R	< ±2.4%	< ±2.4%
C_{N-R}	< 0.5 – 3 μm	< 6%
N_N	< 6%	< 6%
N_R	< 2%	< 2%

Tabla 2.2 Tolerancias admisibles de parámetros geométricos

2.3 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

2.3.1 ATENUACIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA

La atenuación en un conductor de fibra óptica es la pérdida de potencia óptica de un haz de luz al viajar por la fibra hacia su destino. Los materiales usados en la fabricación de la fibra óptica son seleccionados para obtener el más bajo índice de atenuación..

La atenuación que presenta la fibra es independiente de la velocidad de transmisión, lo cual no ocurre en cables convencionales, ya que en ellos es tanto mayor la atenuación cuanto mayor es el régimen binario o velocidad de transmisión (bps: bits por segundo).

Sin embargo, presenta cierta atenuación, en función de sus características físicas, que además, es variable con la longitud de onda de la señal que atraviesa. Se tiene menor atenuación en la segunda y tercera ventana, situadas en las zonas de 800-900 nm y 1500-1600 nm respectivamente, como se indica en la figura 2.24.

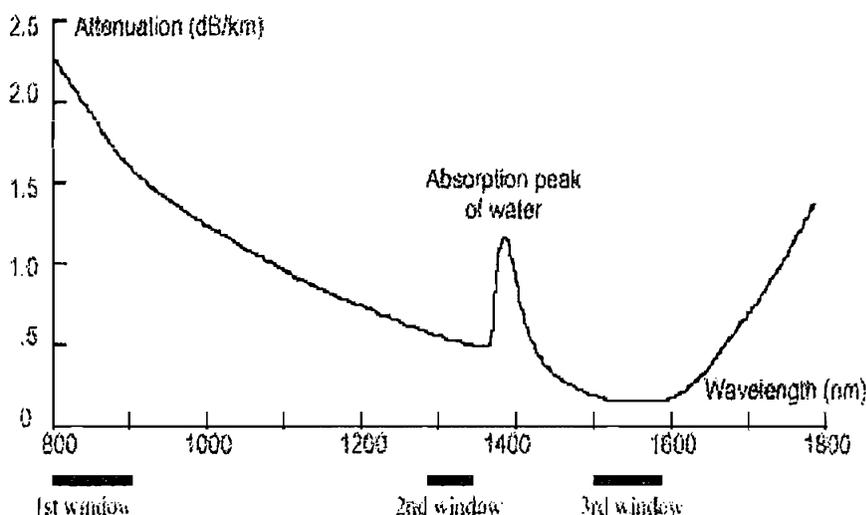


Figura 2.24 Perdidas de atenuación vs longitud de onda

2.3.1.1 Causas de Atenuación

Se tiene cuatro principales factores que producen atenuación en un conductor de fibra óptica, que debilita la señal haciendo necesario el uso de repetidores. Estos factores son:

1.- **Absorción del Material:** debido al material utilizado para la fabricación de fibra óptica se tiene menor o mayor absorción de la energía de la luz que se está transmitiendo. Se tiene diversos tipos de absorción que se mencionan a continuación:

- a) **Absorción UV:** es la estimulación de electrones por fotones con frecuencia ultravioleta.

b) **Absorción IR:** se da por la vibración de moléculas del material, se da en la zona infrarroja y no es posible eliminar esta absorción ya que es propiedad intrínseca del material.

c) **Absorción por hidrógeno (OH⁻):** por la presencia de iones negativos de hidrógeno conocidos como hidroxilos, que absorben energía de la señal.

d) **Absorción por impurezas:** por la presencia de impurezas en el material de la fibra como de hierro (Fe²⁺), cromo (Cr³⁺), iones de cobre (Cu⁺), etc.

2.- Esparcimiento del Material (Scattering): las moléculas del material absorben la energía de la señal incidente en la fibra y la reradían.

Principalmente se tiene el *Esparcimiento de Rayleigh* el cual es proporcional con λ^{-4} y se da por las fluctuaciones en la composición y anisotropía del vidrio²⁰.

El esparcimiento es inevitable y ocurre en todas las direcciones y depende de la longitud de onda.

$$\text{Esparcimiento de Rayleigh: } \alpha_r = 0,622 * \left(\frac{n^2}{2,123 * \lambda} \right)^4$$

3.- Distorsión de la guía óptica: se produce por falta de geometría ideal del núcleo de la fibra óptica.

4.- Radiación por Curvatura: las curvaturas en la fibra óptica introducen pérdidas, estas curvaturas pueden ser lo más mínimas posibles (microcurvaturas: pequeñas irregularidades) estas son producidas en el proceso de fabricación o también curvaturas considerables (macrocurvaturas), que son las producidas externamente por la manipulación de la fibra.

²⁰ Es una propiedad característica de la materia cristalina según la cual la intensidad de una o varias propiedades vectoriales varía.

Como se puede observar en la figura 2.25 las causas de atenuación varían en función de la longitud de onda de la luz incidente en la fibra.

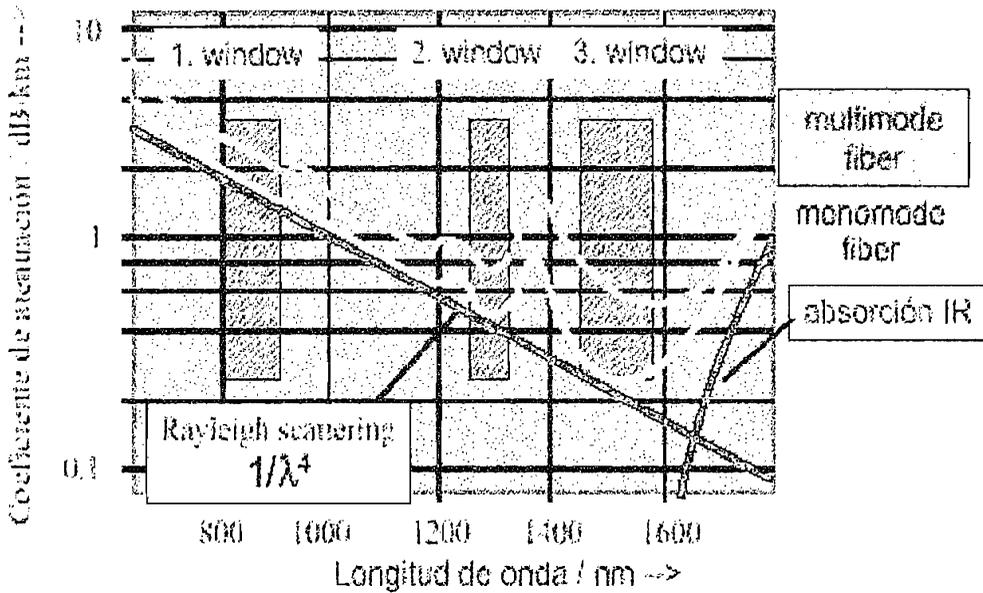


Figura 2.25 Causas de Atenuación en función de la longitud de onda

2.3.2 DISPERSIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA

Es un fenómeno que se presenta en la transmisión de luz a través de la fibra óptica y que produce un ensanchamiento de pulsos de luz transmitidos, es decir la longitud de dichos pulsos aumenta conforme se propagan, como se indica en la figura 2.26.

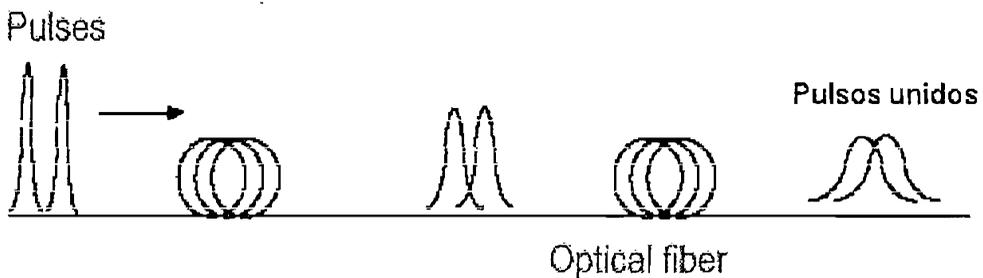
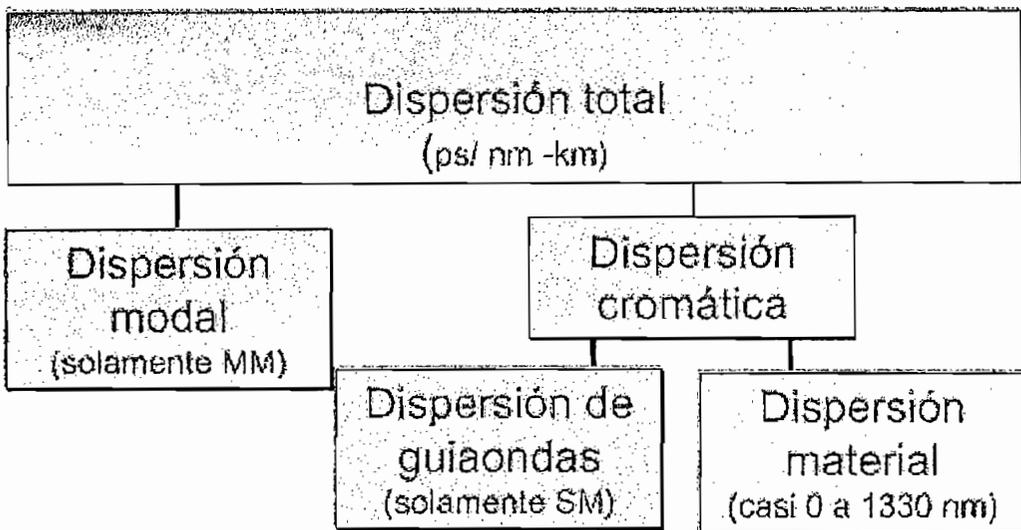


Figura 2.26 Efecto de la dispersión en la fibra óptica

La magnitud de la dispersión depende de la longitud de onda. Una forma de evitar que los pulsos dispersos se unan es incrementando la distancia entre ellos y eso se logra reduciendo la velocidad de transmisión de las señales.

2.3.2.1 Tipos de Dispersión

Básicamente los tipos de dispersión que encontramos en una transmisión de luz por fibra óptica, se muestran a continuación:



Como se puede observar la unión de todos los tipos de dispersiones forman la dispersión total y son las que afectan en la transmisión de señales a través de fibra óptica.

Dispersión Modal (S_{MD}): tiene que ver con las diferentes trayectorias de las señales emitidas, es decir el tiempo que necesita cada rayo (modo) para recorrer la longitud de la fibra es diferente y esto produce la integración de los pulsos que a la larga el receptor no podrá distinguirlos. Este tipo de dispersión sólo existe en fibras multimodo.

Dimensiones: ps/Km²¹ (no interesa el ancho de banda espectral)

²¹ Ps/Km: ensanchamiento de los pulsos en una cantidad de picosegundos (10^{-12} s) por cada kilómetro de longitud de fibra óptica.

Para Fibra óptica perfil escalonado: 20 –50 ns/Km

Para fibra óptica perfil gradual: 0.3 – 1 ns/Km

Dispersión Cromática (S_C): esta dispersión se debe al ancho espectral finito del emisor óptico utilizado, esta a su vez se subdivide en: dispersión del material y dispersión de guíaondas.

Dispersión del Material: en esta dispersión es importante el ancho de banda y se da porque el índice de refracción de la fibra óptica es función directa de la frecuencia de emisión. Su dimensión se da en ps/nm*Km (ensanchamiento de pulsos por cada nanómetro de espectro de emisión en cada Km de fibra)

Dispersión de guíaondas: Se produce por el hecho de que las características de propagación dependen de la longitud de onda (ángulo de un modo o rayo varía con la longitud de onda).

En fibras MM la dispersión de guíaondas es despreciable comparada con la dispersión material (0.1 – 0.2 nm/Km).

En fibras SM es importante la dispersión de guíaondas, es posible diseñar una fibra con índice de perfil apropiado para que el ensanchamiento que originan la dispersión material y de guíaondas se compensen a λ entre 1300 y 1600 nm.

Un dato importante es que la dispersión material es mínima (aproximadamente 0 ps/nm*Km) a una longitud de onda de 1300nm.

Se tiene una dispersión total S que afecta a la transmisión de luz por fibra óptica y se relaciona con las otras dispersiones mediante la siguiente relación:

$$S = \sqrt{S_C^2 + S_{MD}^2} \quad \text{en} \quad \left[\frac{ns}{nm * Km} \right]$$

2.3.3 ANCHO DE BANDA EN LAS FIBRAS ÓPTICAS

El ancho de banda constituye una medida del comportamiento dispersivo de la fibra óptica.

Un pulso que se propaga a lo largo del conductor incrementa su duración a causa de la dispersión. Si este efecto se traslada al campo de las frecuencias, el conductor de fibra óptica se comporta como un filtro pasabajos, como se muestra en la figura 2.27.

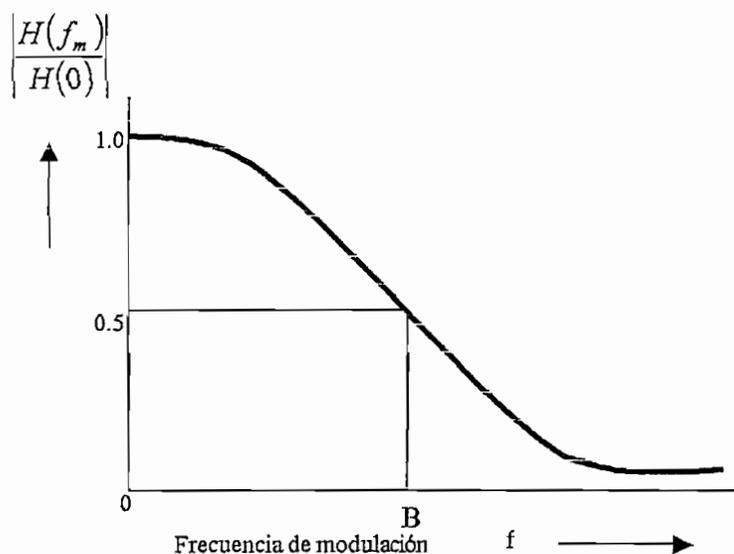


Figura 2.27 Función de transferencia de un conductor de fibra óptica

Entonces en un conductor de fibra óptica a medida que aumenta la *frecuencia de modulación* f decrece la potencia óptica (amplitud) de una onda luminosa hasta quedar anulada. El conductor deja pasar señales de baja frecuencia y atenúa aquellas a medida que aumentan éstas. Si por cada frecuencia de modulación se miden las amplitudes de potencia luminosa de entrada $P_1(f_m)$ y al final $P_2(f_m)$ del conductor de fibra óptica, se obtiene al establecer la relación de ambas amplitudes el valor de la función de transferencia $H(f_m)$.

$$H(f_m) = \frac{P_2(f_m)}{P_1(f_m)}$$

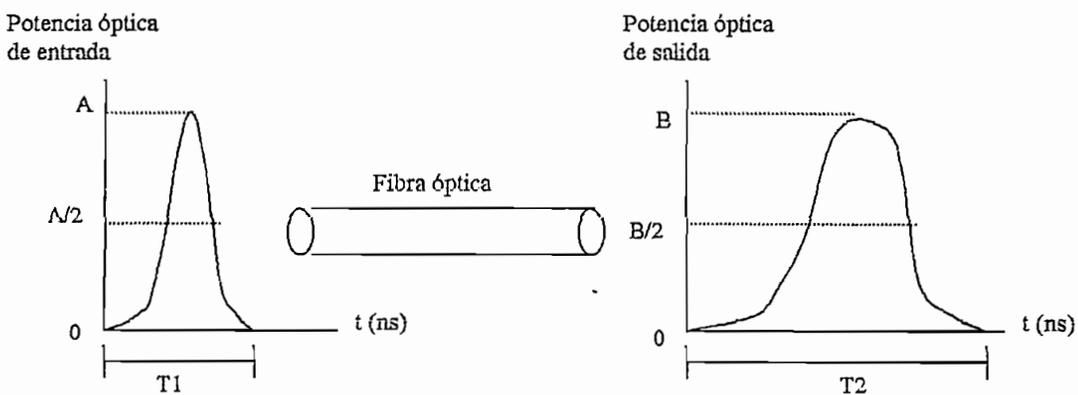
$H(f_m)$ es una función de la frecuencia de modulación f_m . Generalmente se normaliza al valor de la función de transferencia dividiendo para $H(0)$, donde $H(0)$ es el valor de la función de transferencia correspondiente a la frecuencia de modulación $f_m = 0\text{Hz}$, es decir cuando no hay modulación.

La curva que se muestra en la figura 2.27 corresponde aproximadamente al de un filtro pasabajos de Gauss, en la cual la frecuencia de modulación, para la cual el valor normalizado de la función de transferencia es igual a 0.5, se denomina *ancho de banda* del conductor de fibra óptica.

$$\frac{H(f_m = B)}{H(0)} = 0.5$$

El ancho de banda es aquella frecuencia de modulación a la cual la amplitud (potencia luminosa) comparada con el valor que tiene a frecuencia nula, decae ópticamente en un 50% o sea 3 dB.

Si se analiza el ensanchamiento total (dispersión total S) que sufre un pulso gaussiano de entrada por efecto de la dispersión, se puede obtener la duración efectiva de los pulsos de entrada y salida en la fibra óptica.



Entonces el ensanchamiento efectivo (ΔT_{ef}) del pulso que es equivalente a la dispersión total (S) que se produce en la fibra óptica, es igual a:

$$\Delta T_{ef} = \sqrt{T_2^2 - T_1^2} = S = \sqrt{S_C^2 + S_{MD}^2} \text{ en } \left[\frac{ps}{nm * Km} \right]$$

para tener el ensanchamiento total (S) sólo en unidades de picosegundos ($ps = 10^{-12} s$), al valor anterior lo multiplicamos por el ancho espectral ($nm = 10^{-9} m$) del emisor utilizado y por la longitud de la fibra óptica (Km) utilizada.

El valor aproximado del ancho de banda definido a 3 dB de atenuación de potencia óptica respecto a la frecuencia de modulación de 0 Hz es:

$$AB \approx \frac{0.441}{S(ps)} [MHz]$$

2.4 FUENTES Y DETECTORES ÓPTICOS

2.4.1 INTRODUCCIÓN

Los emisores ópticos son transductores (transforman energía eléctrica en energía luminosa) que generan una onda portadora óptica la cual será modulada por las señales eléctricas procedentes de un equipo analógico o digital, en cambio los detectores ópticos reciben señales ópticas que viajan a través de una fibra óptica y las transforman en señales eléctricas las cuales ingresar a algún equipo terminal.

Para transmisión óptica necesitamos un fuente de fotones cuya misión sea convertir una señal eléctrica en energía óptica disponible para viajar a través de la fibra óptica. Estas fuentes han de emitir luz de una longitud de onda adecuada en función de obtener mínimas pérdidas de atenuación que generalmente es en la ventana de 1300 nm o 1550 nm, las fuentes ópticas deben tener las características que se mencionan a continuación

- ❖ Bajo consumo y tamaño reducido

- ❖ Funcionamiento fiable con cambios de temperatura
- ❖ Potencia alta de salida
- ❖ El emisor usado debe admitir en su interior la modulación a la velocidad de transmisión del sistema.

Los detectores ópticos demodulan la portadora óptica recibida a través de la fibra, transformándola en señal eléctrica de información, la cual será amplificada para su uso en el receptor. Los detectores deben cumplir con las siguientes características.

- ❖ Mínima potencia necesaria en la entrada del detector para obtener un bajo BER, típicamente menos de 10^{-10} con el objetivo de permitir la recuperación íntegra de la señal original
- ❖ Bajo consumo y tamaño reducido
- ❖ Que no genere ruido
- ❖ Alto rendimiento en la conversión optoeléctrica.

2.4.2 FUENTES ÓPTICAS

Los dispositivos utilizados como fuentes ópticas de radiación luminosa en los sistemas de comunicaciones ópticas son el láser de semiconductor (diodo láser) y el LED (light emitting diode: diodo emisor de luz).

Las diferencias más significativas entre estos dos tipos de fuentes son las siguientes:

LED: es un emisor de baja potencia y precio relativamente económico que se utiliza para cortas y medias distancias. En general, se utiliza en primera ventana (850nm) y segunda ventana (1300 nm) en fibras multimodo.

LASER: es un dispositivo de alta potencia y por tanto utilizado para grandes distancias, además de tener un precio más elevado que el del LED. Su aplicación se centra en la segunda o tercera ventana de transmisión con fibras monomodo.

Ningún otro tipo de fuente óptica puede modularse directamente a las altas velocidades de transmisión requeridas, con tan baja excitación y tan baja salida.

En función del sistema, escogemos uno u otro. El láser ofrece mejor rendimiento en anchos de banda grandes y largos alcances. Para anchos de banda menores y cortas distancias se suele escoger el LED.

Los componentes utilizados para emitir luz en la ventana de los 850 nm, son galio (Ga), aluminio (Al) y arsénico (As); si agregamos indio (In) y fósforo (P) podemos emitir en las ventanas de los 1300 y 1500 nm.

2.4.2.1 Diodos Led

El proceso de generación de luz en un LED se basa en el efecto de electroluminiscencia, que es el proceso de producción de luz aplicando una fuente de energía eléctrica.

El diodo emisor de luz (LED) es aquel que producirá luz visible cuando se encuentre energizado, con lo cual circulará una corriente que provocará la recombinación de huecos de la banda de valencia²² con electrones de la banda de conducción²³, pasando por la banda prohibida que es el lugar donde no existe recombinación y la cual es sobrepasada por un salto energético (E_g) la cual depende del tipo de material, como se indica en la figura 2.28.

²² Los electrones en una banda de valencia están ligados a los átomos del semiconductor

²³ Los electrones en una banda de conducción pueden moverse por el semiconductor

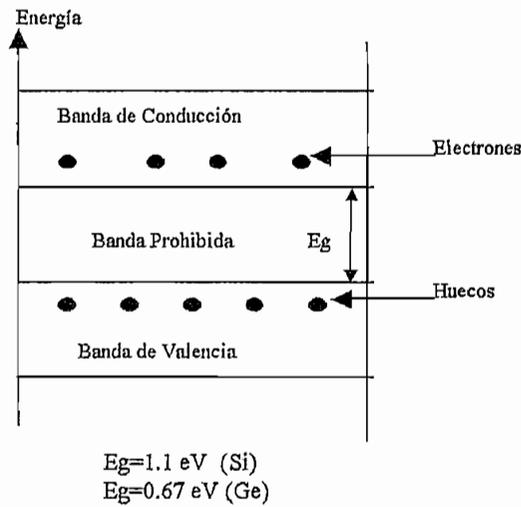


Figura 2.28 Niveles de Energía en un Semiconductor

En cualquier unión $p-n$ polarizada directamente, dentro de la estructura y cerca principalmente de la unión, ocurre una recombinación de huecos y electrones. En todas las uniones $p-n$ de semiconductor una parte de esta energía se convertirá en calor y otro tanto en la forma de fotones. En el silicio y el germanio, el mayor porcentaje se transforma en calor y la luz emitida es insignificante. En otros materiales, como el fosforo arseniuro de galio (GaAsP) o el fosforo de galio (GaP), el número de fotones de la energía luminosa emitida es suficiente para crear una fuente luminosa muy visible. En la figura 2.29 se puede observar la estructura de un LED.

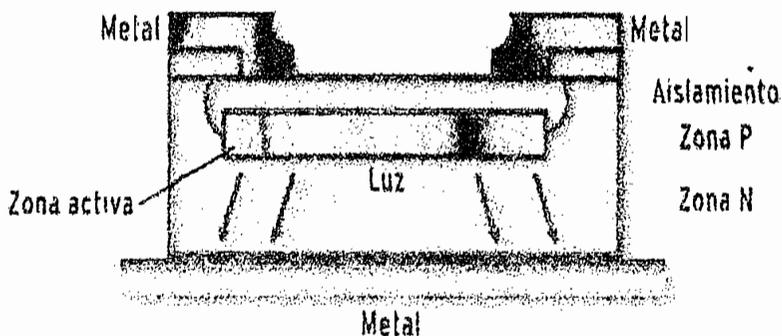


Figura 2.29 Estructura de un diodo LED

Como se ilustra en la figura 2.30, la superficie conductora conectada al material p es mucho menor para permitir que sobresalga un número máximo de fotones de energía luminosa. Nótese en la figura que la recombinación de los portadores inyectados debidos a la unión polarizada directamente da como resultado la emisión de luz en el sitio de la recombinación. Desde luego, es posible que haya algo de absorción de los paquetes de energía fotónica en la propia estructura, pero un porcentaje bastante elevado es capaz de abandonarla, como se muestra en la figura.

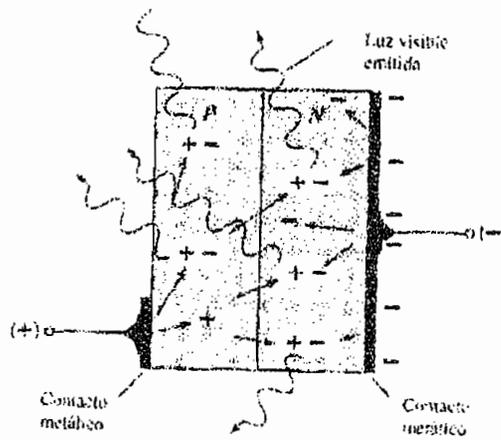


Figura 2.30 Proceso de electroluminiscencia

Para una aceptable emisión de luz de un diodo LED, se lo puede polarizar con un voltaje directo de 1.5 V para que circule una corriente de 10 mA.

En los diodos LED, la emisión en la unión p-n es no coherente, por ende los fotones que componen la radiación luminosa no oscilan en fase entre sí, pues se trata de un fenómeno aleatorio, similar al que ocurre en una emisión por incandescencia. Por eso la potencia de salida es notablemente menor que la del láser, su ancho de banda espectral mucho más amplio y la velocidad de modulación permisible más pequeña, limitándose a un ancho de banda de pocos cientos de MHz.Km. Un ancho de banda típico de un LED es de 200 MHz, con rendimientos de 50 μ W/mA. Los LED presentan un espectro de emisión más ancho que los láser. Un LED de 850 nm. tiene un ancho entre 30 y 50 nm.

La recombinación se da alrededor de la zona de unión y los fotones emitidos emergerán en todas las direcciones posibles y con los diferentes índices de refracción de los medios que circundan la zona activa, por lo que para controlar la emisión se utilizan *heteroestructuras simples o dobles* (uniones de diferente composición), que se basan en la colocación de capas de diferente índice de refracción sobre el semiconductor activo.

En la **figura 2.31** se muestra una heteroestructura doble con los materiales usados en las capas de la heterounión para una longitud de onda de 1300 nm.

Material	InP (Indio-fósforo)	Cubierta "p" para contacto
	InGaAs	Región "p" de intervalo ancho
	InGaAsP	Capa activa "p" de intervalo estrecho
	InP	Región "n" de intervalo ancho
	InP	Sustrato "n"

Figura 2.31 Heteroestructura doble para $\lambda=1300$ nm

La aplicación idónea del LED está en sistemas con:

- ❖ fibras multimodo de apertura numérica alta
- ❖ baja velocidad de transmisión
- ❖ pequeña sección de regeneración

Además de las características anteriormente expuestas, la gran fiabilidad, elevada vida media y un precio aceptable, convierten al LED en la fuente óptica más conveniente para muchos sistemas por fibra óptica.

2.4.2.1.1 Tipos de diodos Led

Existen dos tipos básicos de LED: LED con emisión de superficie y LED con emisión en el borde (ELED). Los primeros emiten luz perpendicular al plano de la unión PN, a través de la superficie, por lo que gran parte de la radiación queda absorbida en el sustrato. En los ELED la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es muy pequeña. Esta estructura permite un mejor rendimiento cuántico externo y un acoplamiento a las fibras.

El diodo de emisión por superficie se indica en la figura 2.32 con su estructura de capas. Si el medio que rodea a la capa activa es GaAs (Galio-Arsénico, $n=3.6$) y en el medio exterior tenemos aire ($n=1$), el mínimo ángulo posible con respecto a la normal a la superficie de emisión es de 16° , cualquier fotón que se emita con un ángulo mayor quedará atrapado por el efecto de reflexión total, en la unión del diodo led con una fibra óptica ($n_1=1.45$), el ángulo máximo de salida del fotón es de 24° , es decir se tiene un rendimiento bajo de este emisor.

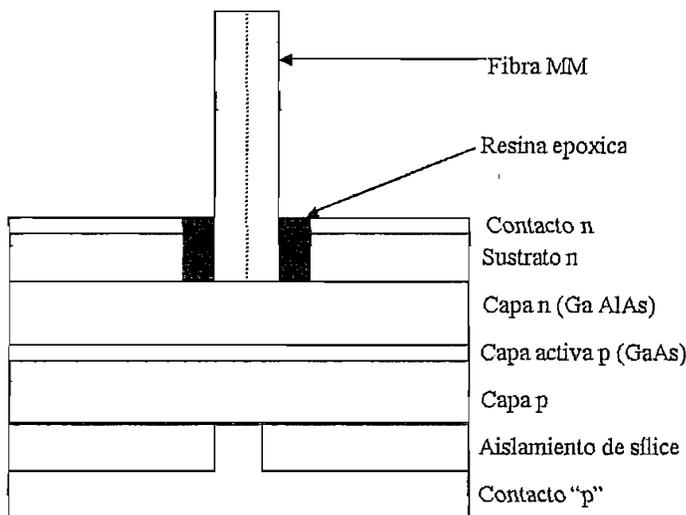


Figura 2.32 Diodo de emisión por superficie

Los diodos ELED emiten luz por el plano de la unión p-n, debido a su heteroestructura que sirve como un guíaondas óptico y dificulta la salida de fotones en el plano perpendicular a la unión. En la figura 2.33 se indica la estructura de un diodo led de emisión por borde.

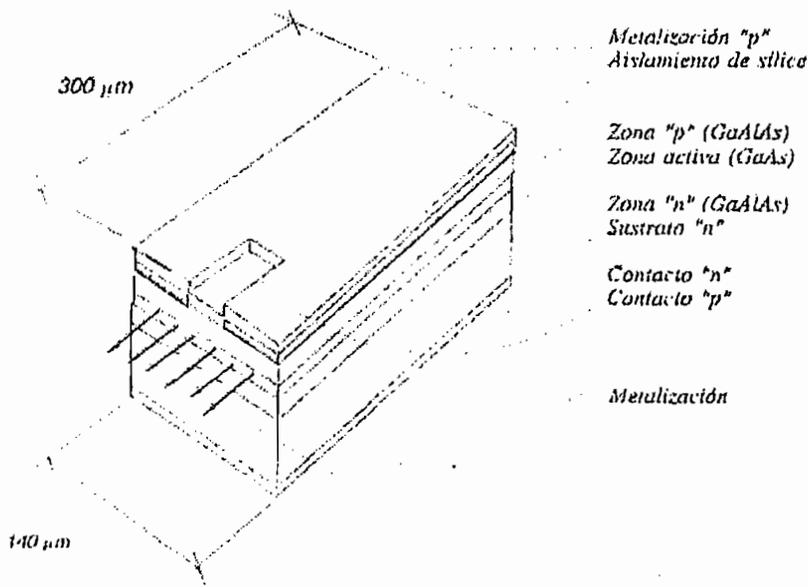


Figura 2.33 LED de emisión de borde con doble heteroestructura

En este tipo de LED se tiene una radiación más direccional que el anterior, por lo que se tiene menores pérdidas de acoplamiento con la fibra, tiene un mejor ancho espectral llegando a 10 nm.

En los dos tipos de Led la temperatura afecta directamente a la longitud de onda de emisión y su ancho espectral.

Las características típicas de los diodos LED corresponden a las mostradas en la tabla 2.3 y el ancho espectral de emisión y la velocidad de modulación se presenta en la figura 2.34.

Característica	Led de emisión por superficie	Led de emisión de borde (ELED)
λ (nm)	850 – 1300	850 – 1300
Ancho espectral (nm)	30 – 110	10 - 50
Corriente de excitación (mA)	20 – 300	20 - 300
Potencia de salida (mW)	1	<3
Ancho de banda (MHz*Km)	10 – 50	50 - 200
Temperatura máxima permisible (°C)	60	60
Tiempo de vida media (h)	10 ⁴	10 ⁴

Tabla 2.3 Características típicas de los diodos LED

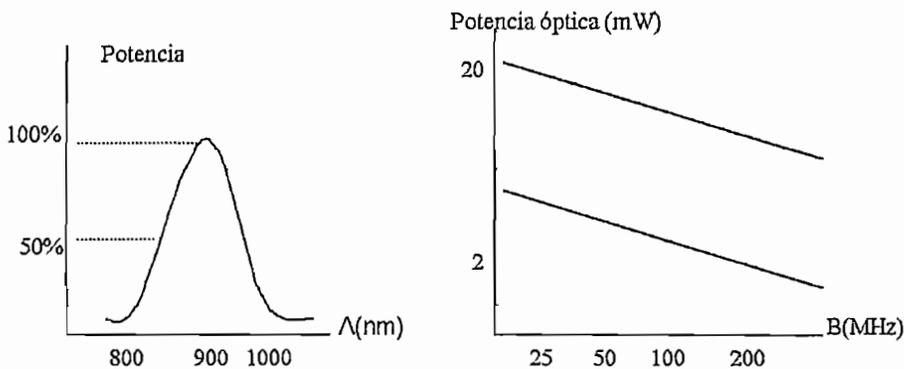


Figura 2.34 Espectro de emisión y ancho de banda del LED

La longitud de onda de emisión de los diodos es controlada por la dosificación adecuada en proporciones de galio (Ga) y aluminio (Al) de la capa activa en la banda de 800 a 900 nm y las proporciones de InGaAsP para diodos de longitud de onda de 1300 o 1500 nm.

La longitud de onda depende de la banda prohibida o salto energético (E_g), con la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad ;$$

donde: $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ constante de Planck

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E_g: 0.2 - 0.3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV: energía necesaria para mover un electrón; } \quad 1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

2.4.2.2 Diodos Láser

El proceso de generación de luz en un diodo láser es similar al del LED, pero con un volumen de generación menor y una alta concentración de portadores inyectados. Se consigue así una elevada ganancia óptica y un espectro de emisión muy estrecho que da lugar a luz coherente.

Los ingredientes básicos de la emisión láser en los diodos son el mecanismo de bombeo y la cavidad óptica resonante. En un láser semiconductor, la ganancia es aportada por una corriente de inyección. De esta manera, los pares electrón-hueco dan la inversión de población necesaria para la emisión láser. La recombinación estimulada lleva a la amplificación de la luz, generando fotones con la misma dirección de propagación, polarización, frecuencia y fase que el fotón que ha inducido la recombinación.

Los pares electrón-hueco deben estar confinados en una zona estrecha para mantener la inversión de población a un nivel elevado. Si no es así, hay que suministrar inyecciones de corriente demasiado grandes al diodo para obtener

emisión láser. Los pares electrón-hueco se llaman *portadores*, y la vida media de los portadores es el tiempo medio que tardan los portadores en recombinar.

En la **figura 2.35** se muestra la estructura básica en capas de un diodo láser simple.

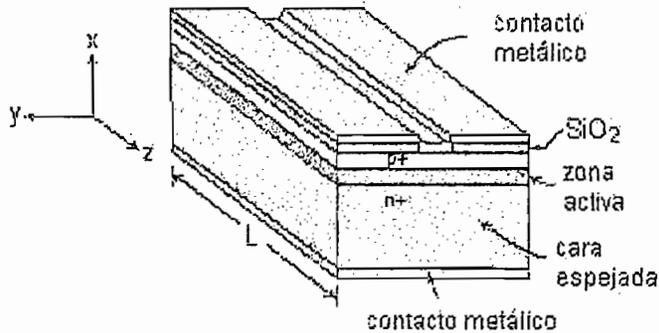


Figura 2.35 Estructura básica de un diodo láser

Las capas de los materiales semiconductores están dispuestas de modo que se crea una región activa en la unión p-n, en la que aparecen fotones como consecuencia del proceso de recombinación. Una capa metálica superpuesta a las caras superior e inferior permite aplicar un voltaje de polarización externo al láser. Las caras del semiconductor cristalino están cortadas de forma que se comportan como espejos de una cavidad óptica resonante.

En la **figura 2.36** se describe la forma en que la radiación láser electromagnética es emitida en un diodo un láser simple. La radiación láser tiene forma rectangular y se difunde a diferentes ángulos en dos direcciones.

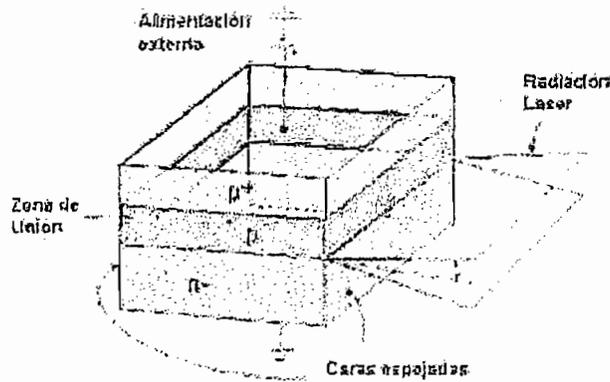


Figura 2.36 Perfil de la radiación láser emitida por un diodo láser simple

Los portadores de carga en un láser de diodo son los electrones libres en la banda de conducción, y los huecos positivos en la banda de valencia.

En la unión p-n , los electrones “caen” en los huecos, que corresponden a niveles de energía más bajos

El flujo de corriente a través de la unión p-n del diodo láser ocasiona que ambos tipos de portadores (huecos y electrones) se recombinen, siendo liberada energía en forma de fotones de luz.

La energía de un fotón es aproximadamente igual a la de la brecha de energía o banda prohibida. La brecha de energía viene determinada por los materiales que componen el diodo láser y por su estructura cristalina.

Curva Corriente-Voltaje de un diodo láser

Si la condición requerida para la acción láser de inversión de población no existe , los fotones serán emitidos por emisión espontánea, esto es serán emitidos aleatoriamente en todas las direcciones , siendo ésta la base de los LED - diodo emisor de luz .

La inversión de población sólo se consigue con un bombeo externo. Aumentando la intensidad de la corriente aplicada a la unión p-n, se alcanza el umbral de corriente necesario para conseguir la inversión de población .

En la figura 2.37 se muestra un ejemplo de la potencia emitida por un diodo láser en función de la corriente aplicada. Se aprecia en la gráfica que la pendiente correspondiente a la acción láser es mucho mayor que la correspondiente a un led.

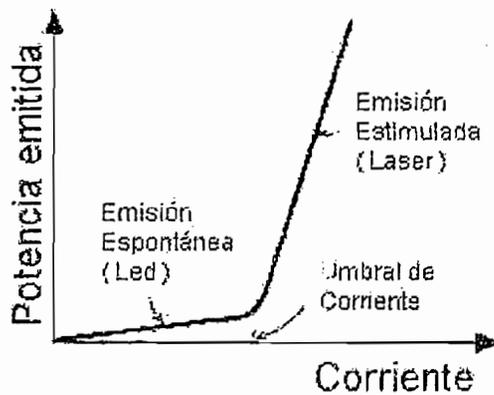


Figura 2.37 Potencia de emisión de un diodo láser en función de la corriente aplicada

El umbral de corriente para el efecto láser viene determinado por la intersección de la tangente de la curva con el eje X que representa a la corriente. Cuando el umbral de corriente es bajo, se disipa menos energía en forma de calor, con lo que la eficiencia del láser aumenta.

En la práctica, el parámetro importante es la densidad de corriente, medida en A/cm², la cual indica la cantidad de corriente que circula por la sección transversal de la unión p-n.

Dependencia del láser con la temperatura

Uno de los problemas básicos de los diodos láser es el aumento del umbral de corriente con la temperatura. La operación del diodo láser a bajas temperaturas

requiere de bajas corrientes. A medida que la corriente fluye por el diodo, se genera calor. Si la disipación no es la adecuada, la temperatura aumenta, con lo que aumenta también el umbral de corriente.

Además, los cambios en temperatura afectan a la longitud de onda emitida por el diodo láser. Este cambio se ilustra en la **figura 2.38**, se compone de dos partes:

- 1.- Un aumento gradual de la longitud de onda emitida proporcional al aumento de temperatura, hasta que
- 2.- Se produce un salto a otro modo longitudinal de emisión

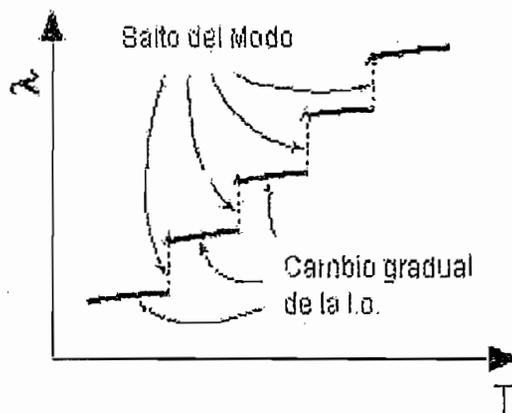


Figura 2.38 Cambio de la longitud de onda emitida en función de la temperatura

Debido a estas variaciones con la temperatura, se necesitan diseños especiales para poder conseguir una emisión continua de alta potencia.

2.4.2.2.1 Tipos de diodos láser

Un factor importante en la construcción de un diodo láser es el confinamiento de la luz dentro del área activa. Dicho confinamiento se acompaña por la deposición de distintos materiales cerca de la zona activa. Por tanto, la primera clasificación

de los diodos láser considera los tipos de estructura cercanos a la zona activa, como se puede apreciar en la figura 2.39.

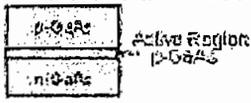
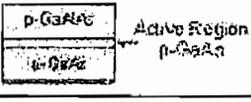
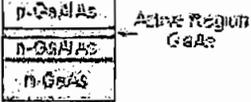
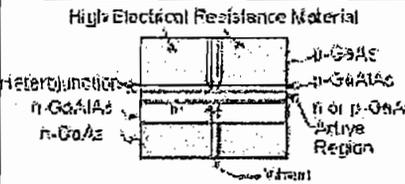
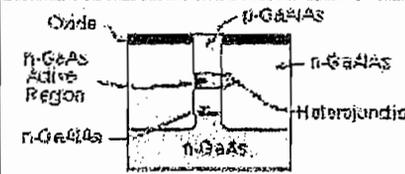
TIPO	ESTRUCTURA
Homojunction	
Single Heterojunction	
Double Heterojunction	
Gain-Guided Stripe	
Striped Heterojunction (Index-Guided Stripe Geometry)	

Figura 2.39 Ejemplos de distintos tipos de estructura de confinamiento

El nombre de cada grupo o familia viene dado por el tipo de materiales existentes cerca de la capa activa :

Homojunction laser - Láser de unión homogénea.- Todo el láser está constituido por un mismo material, normalmente GaAs - Arsenuro de Galio . En este tipo de estructura simple, los fotones emitidos no están confinados en direcciones perpendiculares al eje del láser, con lo que su eficiencia es muy baja .

Single Heterostructure - Estructura heterogénea simple.- En un lado de la capa activa existe otro material con una brecha de energía (salto energético) diferente. Esta diversidad de brechas de energía motiva un cambio en el índice de refracción de los materiales, de modo que se pueden construir estructuras en guía de ondas que confinan a los fotones en un área determinada . Normalmente , la

segunda capa es de un material similar al de la primera, solo que con un índice de refracción menor .

Ejemplo: El GaAs (Arseniuro de Galio) y el GaAlAs (Arseniuro de Galio Aluminio) son materiales próximos utilizados habitualmente .

Double Heterostructure – Estructura heterogénea doble.- Un material distinto se coloca a ambos lados de la capa activa, con un índice de refracción menor (mayor brecha de energía). Este tipo de estructuras confinan la luz dentro de la capa activa, por lo que son más eficientes .

Ejemplo: Capa activa de GaAs confinada entre dos capas de GaAlAs.

Diodos Láser orientado a Ganancia - Gain Guided.- Aislado los electrodos metálicos en las partes superior e inferior, se limita la zona por donde pasa la corriente. Como resultado, la inversión de población sólo tiene lugar en la zona específica por donde pasa la corriente.

Un ejemplo se muestra en la figura 2.39, en donde un electrodo de tira delgada se sobrepone al láser. La corriente limita el área en la zona activa en donde puede existir el efecto de amplificación, y ésta sólo podrá existir en ésta zona.

Index Guided Lasers - Láseres orientados al índice.- Actualmente una estructura habitual es una tira estrecha de la capa activa (Stripe Geometry - Geometría en tiras), confinada por todos los lados (tanto horizontal y verticalmente) con otro material.

Montura de un diodo láser

Se requieren monturas especiales para los diodos láser, debido a su tamaño miniaturizado, para poder ser operativos y cómodos. Existen muchos tipos de monturas, pero quizás el más estándar es similar a un transistor, e incluye en la

montura las ópticas necesarias para colimar²⁴ el haz, como se observa en la figura 2.40.

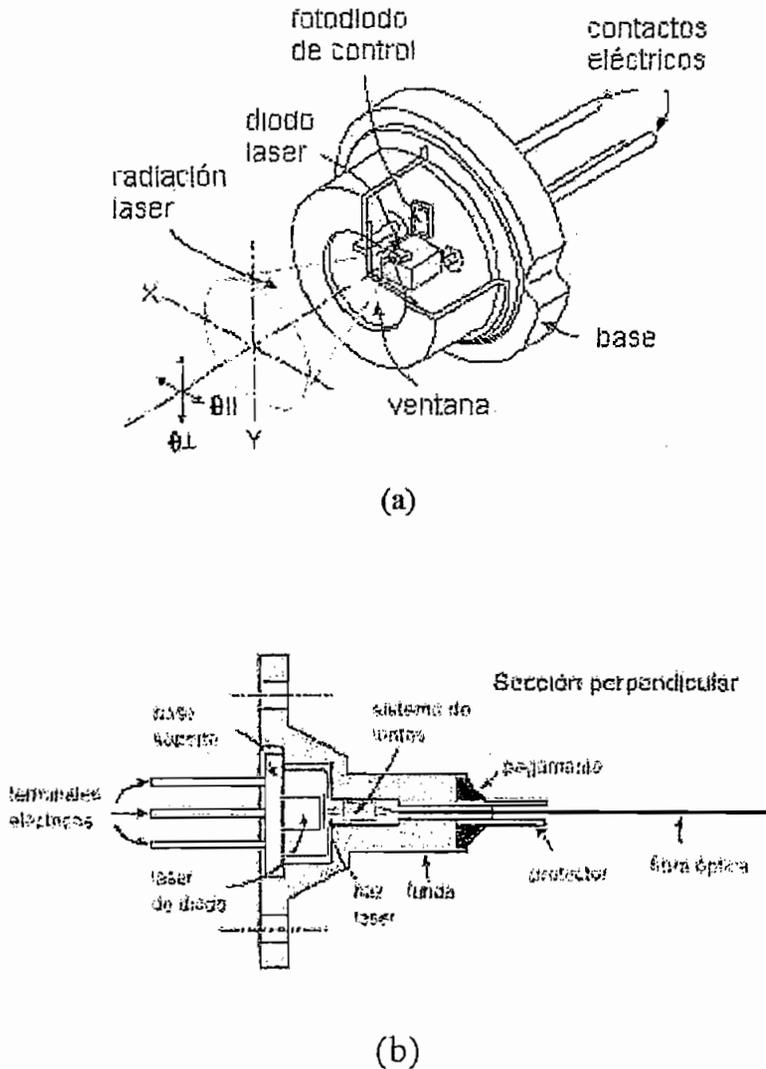


Figura 2.40 a) Montura de un láser comercial. b) Sección perpendicular

Cavidades ópticas especiales en los diodos láser

La cavidad óptica más simple es la creada al pulir los extremos del cristal de semiconductor del que se compone el láser. El pulido crea un plano perpendicular al plano del medio activo, de modo que es perpendicular al eje del láser.

²⁴ Obtención de un haz de rayos luminosos paralelos

Debido al alto índice de refracción ($n \gg 3.6$) de los materiales utilizados, la reflexión de la cara pulida es de aproximadamente el 30%. Es posible cambiar esta reflexión utilizando técnicas de metalizado en capas. Un tipo de capa es el 100% reflectante en uno de los lados del diodo láser.

En algún tipo de láser, las pérdidas que atraviesan la capa trasera son utilizadas para controlar la potencia emitida por la parte delantera, obteniéndose una retroalimentación en tiempo real.

Un tipo distinto y más complicado puede fabricarse integrando una red de difracción cerca de la capa activa del láser. Existen dos tipos de estructura que utilizan redes de difracción en vez de capa espejada en un extremo de la cavidad como se puede ver en la figura 2.41.

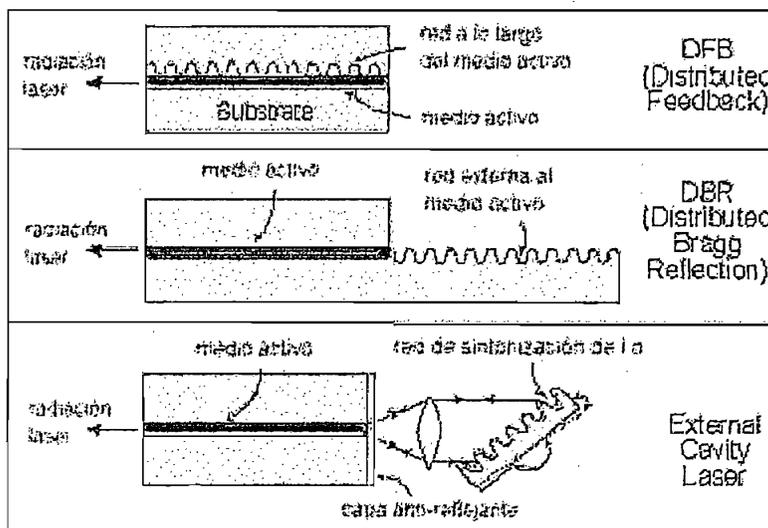


Figura 2.41 Cavidades ópticas especiales utilizadas para obtener líneas de emisión estrechas

DFB - Distributed FeedBack Laser - Retroalimentación distribuida.- la red de difracción se distribuye a lo largo de todo el medio activo. La longitud de onda de la red determina la longitud de onda emitida por el láser, en una línea muy fina del espectro.

DBR - Distributed Bragg Reflector - Reflector de Bragg distribuido.- la red de difracción está fuera de la zona activa, en donde no circula corriente (parte pasiva de la cavidad)

Diodos láser Acoplados

Existen también estructuras especiales en donde dos láseres se acoplan ópticamente. La radiación emitida por el primer láser es transferida al segundo, que es controlado por otra fuente de alimentación. Un ejemplo puede verse en la figura 2.42.

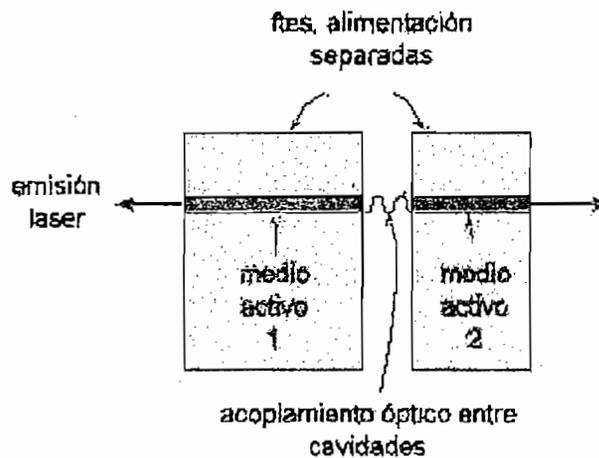


Figura 2.42 Diodos láser con acoplamiento óptico

2.4.3 DETECTORES ÓPTICOS

La función de un detector óptico es la de convertir señal óptica que procede de la fibra en señal eléctrica como primera parte del proceso de recepción; a continuación, la señal se regenera para llevarla a un equipo terminal o para ser incorporada a la siguiente etapa de un repetidor electro - óptico.

El detector óptico utilizado juega un rol determinante en el funcionamiento del sistema ya que sus características pueden significar un menor número de repetidores o mayor número de canales.

El tipo más sencillo de detector corresponde a la unión p-n de un semiconductor cuyo intervalo de energía (E_g) entre las bandas de valencia y de conducción es pequeño, lo que permitirá que un fotón que incida en la unión tenga energía para permitir la creación de un par electrón-hueco. Ambos portadores circularán en sentidos opuestos, creando una fotocorriente inversa sobre el circuito externo, como se muestra en la **figura 2.43**.

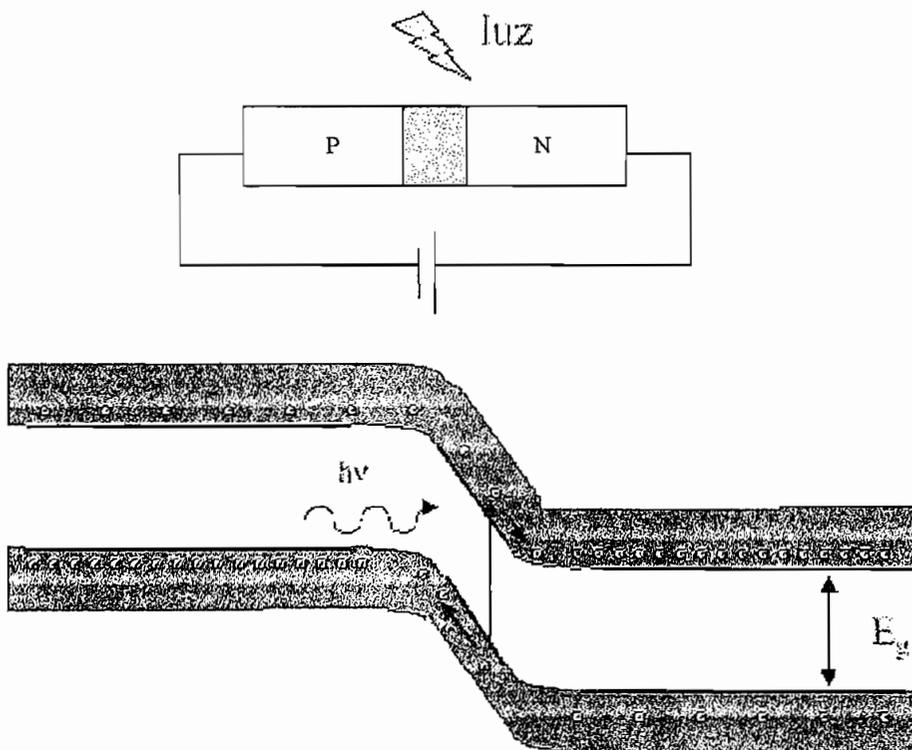


Figura 2.43 Fotodiodo PN

El dispositivo está polarizado inversamente, lo que crea un campo eléctrico fuerte atrayendo a los portadores a través de la juntura.

El fotón incidente con energía $\geq E_g$ genera el par electrón-hueco (portadores). El campo eléctrico fuerte drena de inmediato a estos portadores a través de la

juntura, produciendo corriente. Dicha fotocorriente inversa producida en el diodo puede determinarse mediante la siguiente relación:

$$I_p = \frac{P_{opt} q (1-r)}{h\nu} (e^{-\alpha d})(1 - e^{-\alpha L})$$

donde: P_{opt} : Potencia óptica incidente

$q=1.6 \times 10^{-19}$ C carga del electrón

r : coeficiente de Fresnel en el interfaz aire-semiconductor

$$r = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad n: \text{índice de refracción del semiconductor} = 3.5$$

- Se puede agregar una capa antireflexión para disminuir r

α : coeficiente de absorción (debe ser alto para una buena conversión de luz a corriente)

d : ancho de la región p , que la luz debe recorrer antes de llegar a la región de absorción

L : ancho de la región de absorción

V : velocidad del fotón incidente

Característica I – V de un fotodiodo PN

La característica I-V de un fotodiodo es la misma que la de un diodo normal añadiendo la fotocorriente inversa, i_p , proporcional al flujo de fotones recibido:

$$I = I_s \left(e^{\frac{kV}{T_k}} - 1 \right) - I_p$$

donde: I_s : corriente de saturación inversa

$k = 11,600/\eta$, η depende del material semiconductor utilizado, con $\eta = 1$ para el Ge y $\eta = 2$ para el Si.

V: Voltaje de polarización inversa del fotodiodo

$T_k = T_c + 273^\circ$, temperatura de operación del diodo

I_p : fotocorriente inversa

En la figura 2.44 se muestra la curva característica I-V para la unión pn:

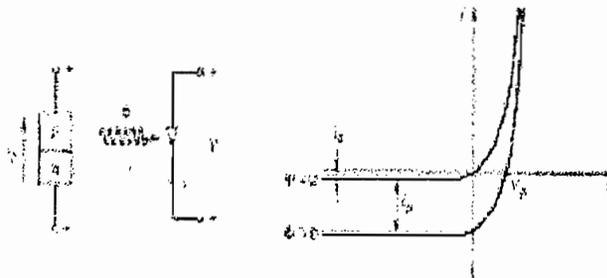


Figura 2.44 Curva I-V del fotodiodo pn

Los detectores mayormente utilizados son los fotodiodos semiconductores PIN y APD (Fotodiodo de Avalancha). Estos diodos trabajan también en polarización inversa.

- PIN: se trata de una versión mejorada de una unión PN elemental que trabaja polarizado inversamente. Son utilizados de forma general en 850 nm y 1300 nm, con independencia del tipo de fibra óptica.

- APD: También conocido por el nombre de fotodiodo de avalancha. Se trata de una unión PN polarizada fuertemente en inversa cerca de la región de ruptura que origina un efecto multiplicativo de la corriente generada. Necesita de elevadas tensiones de polarización (centenares de voltios).

Los requerimientos que deben cumplir los detectores usados en comunicaciones ópticas, son los siguientes:

- ❖ Alta sensibilidad en longitud de onda de operación
- ❖ Gran respuesta eléctrica a la señal óptica recibida
- ❖ Gran ancho de banda (respuesta temporal corta)
- ❖ Mínimo ruido
- ❖ Estable e independiente de cambios en las condiciones ambientales
- ❖ Pequeña dimensión (acoplamiento eficaz a la fibra)
- ❖ Bajo costo

2.4.3.1 Detectores PIN

Un detector PIN es una estructura mejorada del detector simple p-n , en la cual se tiene una capa p , la capa activa que para este detector se denomina capa *intrínseca* (depleción o empobrecimiento) hecho de material ligeramente dopado y la capa n .

Esta estructura tiene una serie de ventajas respecto al fotodiodo de unión PN simple:

1.- Al aumentar la zona de depleción se aumenta la zona donde se puede capturar los fotones y convertirlos en corriente (teorema de Ramo-Shockely).

2.- Aumentando la zona de deplexión se disminuye la capacidad de la unión PN y por tanto el tiempo de respuesta.

Para lograr una estructura PIN (Ver figura 2.45) se ensancha la región intrínseca (i) agregando entre las capas n y p material de semiconductor intrínseco, con esto se agranda el valor de L en la fórmula de fotocorriente. El material intrínseco es elegido de tal manera que tenga una alta absorción a la longitud de onda requerida.

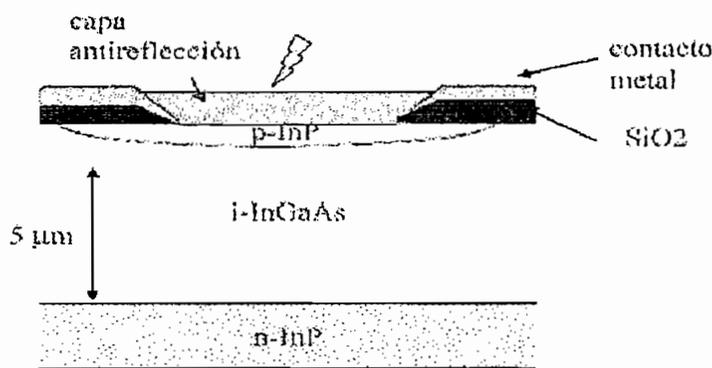
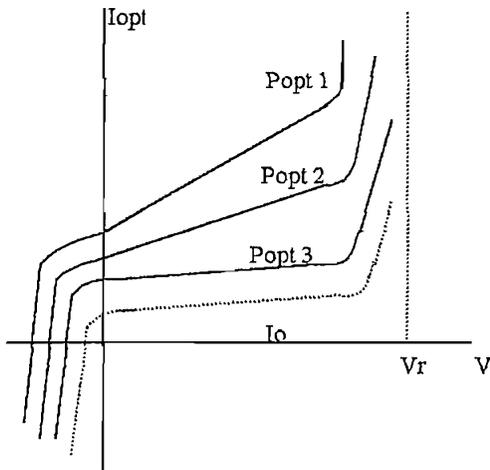


Figura 2.45 Estructura del fotodiodo PIN

La estructura PIN mostrada, tiene como material absorbente de luz un compuesto de InP (Indio – Fósforo), la región intrínseca es de un espesor de $5\mu\text{m}$ y un diámetro de $100\mu\text{m}$, la cual va situada sobre un sustrato n de InP. La capa P está cubierta con una capa antirreflejante que reduce la reflexión de luz, hacia el exterior.

La característica voltaje de polarización inversa vs corriente de un fotodiodo PIN, se indica en la figura 2.46.



Vr: tensión de ruptura
Io: Corriente de oscuridad
Popt: Potencia óptica incidente
Popt 1 > Popt 2 > Popt 3

Figura 2.46 Característica Voltaje – Corriente de un diodo PIN

En la figura antes indicada se muestra que la corriente de portadores mayoritarios aumenta con la potencia óptica de recepción..

A partir de determinado voltaje, la fotocorriente aumenta bruscamente a consecuencia de la alta energía que el campo eléctrico existente produce en los portadores minoritarios, formados en la zona de deplexión, dichos portadores de gran energía cinética, provocan la creación de nuevos portadores debido al choque de los portadores minoritarios con la estructura atómica de la región de deplexión, los nuevos portadores están sometidos al mismo campo.

Cuando no existe luz incidente, el detector origina una pequeña corriente parásita o llamada *corriente de oscuridad*, la cual provoca ruido. Esta corriente de oscuridad se da por que los fotodetectores no son perfectos, haciéndolos emitir una determinada corriente, incluso aunque estén sumergidos en la oscuridad absoluta, lo cual se debe principalmente a la agitación térmica (difusión de portadores minoritarios de origen térmico), esta corriente es del orden de algunos picoamperios ($pA=10^{-12}A$) a una temperatura de 25°C.

La zona de trabajo de un PIN se da a voltajes menores que el de ruptura, generalmente son bajas tensiones del orden de 15V.

El ancho de banda en estos fotodetectores está limitada por el tiempo (τ_{tr}) empleado por las cargas en atravesar la región de deplexión, obteniéndose valores próximos a 500 MHz. El ancho de banda del fotodiodo PIN, tiene la siguiente relación:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$$

τ_{RC} : constante de tiempo de un circuito equivalente RC

y

$$\tau_{tr} = \frac{W}{V_d}$$

W: anchura de la región de vaciamiento

V_d : Velocidad de arrastre

Valores Típicos: $W \approx 10 \mu m$; $V_d \approx 10^5 m/s$; $\tau_{tr} \approx 100 ps$

2.4.3.2 Detectores APD

Al igual que los diodos PIN trabajan en polarización inversa. Antes de recibir impulsos luminosos el número de electrones libres en la zona de deplexión no es suficiente para desencadenar la avalancha (el fotodiodo no conduce). Al llegar las ondas luminosas, los fotones liberan electrones y se desencadena la avalancha (el fotodiodo conduce). Naturalmente, estos diodos están diseñados para soportar sin daño la avalancha.

Este fotodetector funciona convirtiendo cada fotón en una "avalancha" de electrones. Por tanto, una luz débil puede producir suficiente corriente eléctrica como para ser detectada. La avalancha se produce según el siguiente mecanismo (Ver figura 2.47):

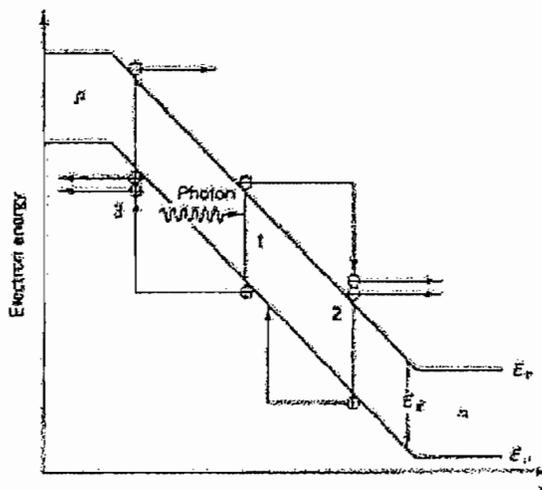


Figura 2.47 Proceso de avalancha

- 1.- Un fotón genera un par electrón-hueco (1)
- 2.- El electrón se mueve por el diodo debido al campo eléctrico y adquiere la energía suficiente (E_g) para generar otro par electrón-hueco (2) (El coeficiente de ionización²⁵ de electrones cuantifica este proceso)
- 3.- El anterior hueco (1), también puede generar otro par electrón-hueco (El coeficiente de ionización de huecos cuantifica este proceso) y así sucesivamente, hasta formar la avalancha.

A este proceso de generación de pares electrón – hueco se le conoce como *ionización de impacto*, el cual produce una multiplicación de pares electrón-hueco, generando así una mayor corriente reversa.

Un fotodetector APD se fabrica con los mismos materiales utilizados para un fotodiodo PN, pero procurando unos coeficientes de ionización adecuados. El ancho de banda de un fotodetector APD está limitado por el tiempo necesario para formar la avalancha y depende del factor de multiplicación " M ", motivo por el cual presenta anchos de banda menores que un PIN.

²⁵ Es una constante de proporcionalidad correspondiente a la generación de un par electrón-hueco

En la figura 2.48 se muestra la estructura de un detector APD, que se diferencia con el fotodiodo PIN por la presencia de una capa adicional (región de ganancia), en la cual ocurre la ionización de impacto (avalancha) y la multiplicación de corriente.

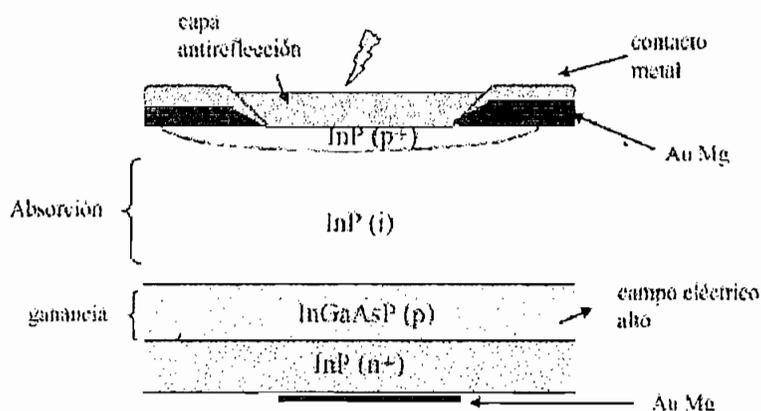


Figura 2.48 Estructura de un detector APD

Características del detector APD

- ❖ En un fotodetector APD se da el fenómeno de amplificación de corriente, es decir tiene una ganancia interna de corriente
- ❖ Voltaje de polarización inversa requerido muy alto (100-400V)
- ❖ Para evitar una ruptura por avalancha (crecimiento de corriente sin control en relación con la potencia incidente), el voltaje es puesto a 10% menor del voltaje de ruptura
- ❖ Tiempo de respuesta limitado por: tiempo de tránsito de los portadores a través de la región de absorción, tiempo necesario para la realización del proceso de multiplicación de avalancha

Ganancia interna de un APD

Como se indicó anteriormente el fotodetector APD tiene una región donde se produce la multiplicación de la corriente, es decir ahí se produce una ganancia interna de corriente, la cual está determinada por el factor de multiplicación M , que tiene la siguiente relación:

$$M = \frac{I_{APD}}{I_f}$$

donde: M : factor de multiplicación de corriente o ganancia interna del APD, valores típicos de M entre 30 y 100.

I_{APD} : Corriente de salida (con multiplicación de portadores)

I_f : corriente inicial antes de la multiplicación

La naturaleza de la avalancha da origen a un proceso de ruido, el cual también puede multiplicarse por influencia del factor M , motivo por el cual se requiere un valor óptimo de este factor.

Eficiencia cuántica y Sensibilidad del Detector

La eficiencia cuántica de un detector (η) es la razón entre fotones incidentes r_f y los electrones generados r_e .

$$\eta = \frac{r_f}{r_e} \text{ en (\%)}$$

La eficiencia cuántica no involucra a la energía fotónica, por eso el concepto de *Sensibilidad (S) o Responsividad* del detector, la cual se define como:

$$S = \frac{I}{P_i} \quad \text{en } (\mu\text{A/mW})$$

donde: I: fotocorriente de salida
 P_i: Potencia óptica incidente

La sensibilidad es el nivel mínimo de señal, que puede ser detectado para un determinado valor de BER (tasa de bits errados), su unidad son (#fotones/bit) y es un factor importante para el diseño del receptor.

La cual se relaciona con la eficiencia cuántica de la siguiente manera:

$$S = \eta \frac{q}{h\nu} \cong \eta \frac{\lambda}{1.24} \quad (\lambda \text{ en } \mu\text{m})$$

Proceso básico de detección

En la figura 2.49 se indica es esquema del proceso básico de detección:

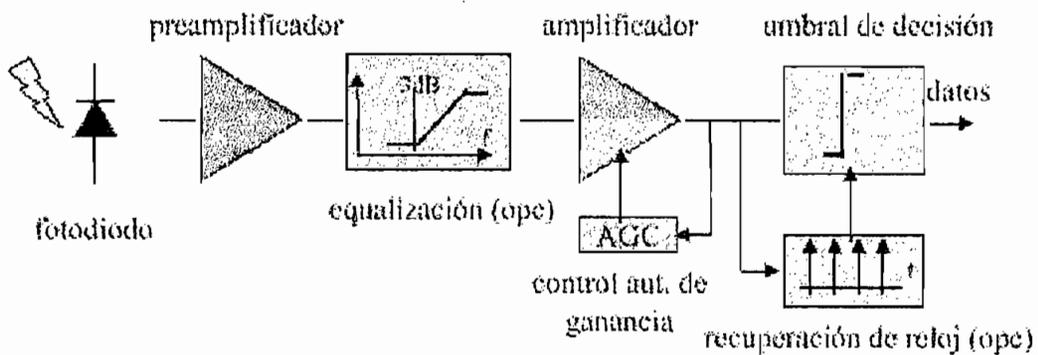


Figura 2.49 Proceso de detección

El proceso de detección en un sistema óptico, consta de las siguientes partes:

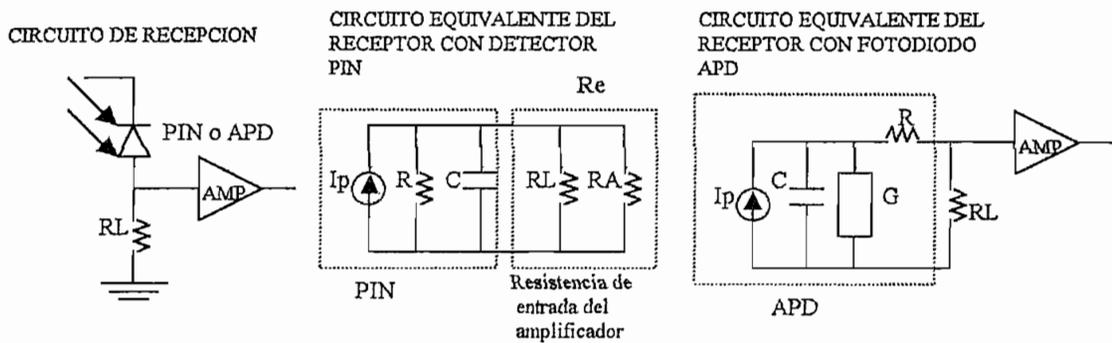
Preamplificador.- es aquel que provee una señal adecuada al siguiente circuito (equalización) ya que la señal recibida por el detector utilizado puede ser muy débil.

Equalización.- para favorecer frecuencias atenuadas por el restringido ancho de banda del preamplificador.

Control automático de ganancia.- provee un nivel promedio de señal independiente de la potencia llegada

Relación Señal a ruido en un detector (SNR)

Un circuito de recepción básico consta del detector óptico y del circuito de amplificación, como se muestra a continuación:



En las ilustraciones anteriores se indican los circuitos equivalentes de un circuito para recepción con diodo PIN y fotodiodo APD.

En el circuito equivalente del receptor con detector PIN se tiene los siguientes elementos:

I_p : fotocorriente óptica

R : resistencia interna del PIN (decenas de ohmios)

C : capacidad de pocos picofaradios

R_L : resistencia de carga (pocos kilohmios)

R_A : resistencia de entrada del amplificador

R_e : resistencia equivalente del amplificador

Y la relación señal a ruido (SNR) para un receptor con detector PIN es:

$$SNR_{(PIN)} = \frac{I_p^2}{2e(I_p + I_o)B + \frac{4KTB}{R_e}}$$

donde: $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C

I_o : corriente de oscuridad

B: ancho de banda del canal óptico

K: constante de Boltzman = 1.380658×10^{-23} J/K

T: temperatura absoluta (°K)

$$R_e = R_L || R_A$$

Si utilizamos un fotodiodo APD, la relación señal a ruido es:

$$SNR_{(APD)} = \frac{I_p^2}{2eB(I_p + I_o)F + 2eB \frac{I_p}{M^2} + \frac{4KTB}{R_e M^2}}$$

donde: F. Factor de exceso de ruido e igual a:

$$F = M \left[1 - \frac{(1 - k_i)(M - 1)^2}{M^2} \right]$$

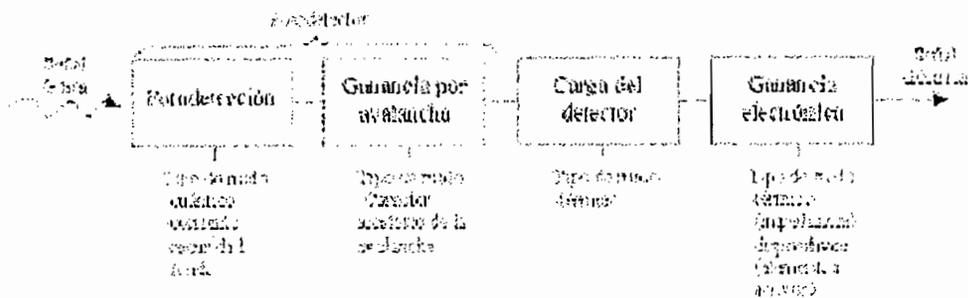
k_i : coeficiente de ionización de huecos a electrones

M: ganancia interna del APD

2.4.3.3 Ruido en Receptores Ópticos

El ruido es una modificación no deseada de la señal en un sistema de comunicaciones.

Se tiene distintas fuentes generadoras de ruido en un receptor óptico, como se muestra a continuación:



La mayoría de estas fuentes de ruido pueden aplicarse tanto a fotodiodos PN, PIN y APD's.

El ruido debido a la radiación ambiente, que es importante en los sistemas de transmisión eléctrica y en radio frecuencia es despreciable en los sistemas de fibra óptica, pero las demás fuentes si se consideran.

El caso más complejo se da en el fotodiodo de avalancha (APD) debido a la naturaleza aleatoria de mecanismo de ganancia interna.

En comunicaciones ópticas se produce ruido debido a fluctuaciones espontáneas en lugar de las interferencias electromagnéticas de la transmisión por cable eléctrico. Hay tres tipos de fluctuaciones espontáneas que son: el ruido térmico, el ruido de corriente de oscuridad y el ruido cuántico.

Ruido térmico

Es debido a la interacción térmica de los electrones con los iones (que están vibrando) en un medio conductor, es el ruido principal en las resistencias.

La corriente de ruido térmico i_t en una resistencia se expresa a través de su valor medio cuadrático como:

$$\overline{i_t^2} = \frac{4 * K * T * B}{R_L}$$

donde K es la constante de Boltzman, T es la temperatura en grados Kelvin, B es el ancho de banda eléctrico y R_L la resistencia de carga en ohmios.

Ruido de corriente de oscuridad

Este ruido contribuye al total y genera fluctuaciones aleatorias sobre la corriente de oscuridad. Su valor depende de la magnitud de ésta corriente y su relación funcional es:

$$\overline{i_d^2} = 2 * e * B * I_d$$

donde e es la carga del electrón e I_d es la corriente de oscuridad, la cual depende del tipo de fotodiodo y sólo es reducible mediante mejoras en la fabricación de éste.

Ruido cuántico

Ya se conoce la naturaleza cuántica de la luz y se sabe que la energía de uno de estos cuantos (quantum) llamado fotón es $E = hf$. Debemos tener en cuenta el comportamiento cuántico de la luz, ya que para frecuencias ópticas ($hf > KT$; donde $KT=25$ meV para temperatura ambiente), las fluctuaciones cuánticas predominan sobre las térmicas.

La detección de la luz es un proceso discreto ya que la generación de un par electrón-hueco es debida a la absorción de un fotón y entonces la señal que tenemos en el fotodetector depende de la llegada o no de fotones.

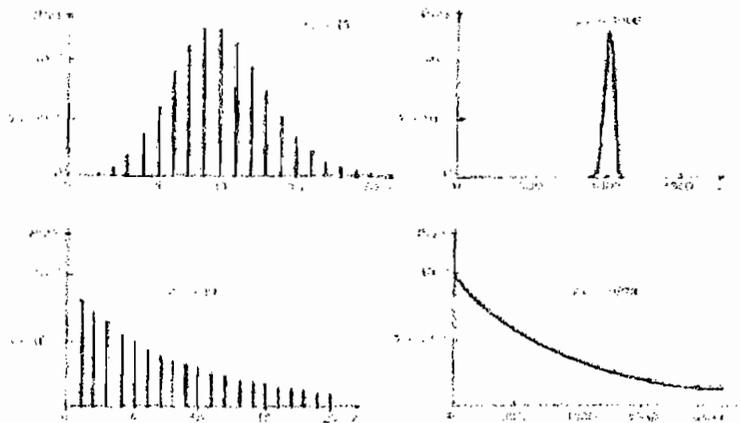
Así pues la estadística para la llegada de radiación coherente al fotodetector sigue una distribución de probabilidad discreta que es independiente de los fotones que ya han llegado previamente. Por ejemplo la probabilidad de detectar z fotones en un periodo τ cuando la cantidad esperada es de Z_m obedece la siguiente distribución de Poisson:

$$P(z) = \frac{Z_m^z * e^{-Z_m}}{z!}$$

Por otro lado si la luz que recibe el fotodetector no es coherente implica que no hay ninguna relación de fase entre los fotones emitidos. Esta propiedad modifica la distribución de probabilidad que será:

$$P(z) = \frac{Z_m^z}{(1 + Z_m)^{z+1}}$$

Estas dos distribuciones, se ilustran a continuación:



Distribuciones de probabilidad para distribuciones estadísticas de luz (a) coherente y (b) incoherente

Dichas distribuciones permiten el cálculo de la probabilidad de error en una transmisión.

2.4.3.3.1 Ruido en fotodetectores PN y PIN

Para fotodiodos pn y pin (sin ganancia), el ruido térmico procedente de la carga resistiva y de los elementos activos (por ejemplo un operacional) es predominante.

Además, estos dispositivos presentan el ruido debido a la corriente de oscuridad y el ruido cuántico. La corriente resultante de ambas fuentes de ruido puede combinarse resultando:

$$\overline{i_{TS}^2} = 2 * e * B * (I_p + I_d)$$

donde: e: carga del electrón

B: ancho de banda del receptor óptico

I_p : corriente del fotodiodo

I_d : corriente de oscuridad

2.5 MODULACIÓN Y MULTIPLEXACIÓN

2.5.1 MODULACIÓN

En los sistemas de transmisión por fibra óptica, como en los sistemas convencionales, la información es transmitida modulando una portadora luminosa, la cual puede hacerse con señales eléctricas análoga o digital. En el caso análogo, la intensidad del haz luminoso emitido varía continuamente, en tanto que

en el caso de la modulación digital, la intensidad de luz tiene variaciones discretas en forma de pulsos luminosos del tipo on-off keying (OOK).

Los sistemas de transmisión por fibra óptica del tipo digital, involucran el uso de un codificador, donde la señal digital que viene de la fuente de información es codificada convenientemente para la transmisión óptica, y de un decodificador óptico que, en recepción, se encarga de decodificar la información digital original.

Esta relativa mayor complejidad de los sistemas digitales es, en tanto, compensada, en la práctica, por su gran desempeño en términos de capacidad de transmisión del enlace.

2.5.1.1 Modulación Óptica

Un sistema básico de transmisión de luz por fibra óptica incluye una fuente de luz, una fibra óptica y un fotodetector.

La información proveniente del circuito excitador es transformada en señales luminosas a través de la fuente de luz. Estas señales luminosas son propagadas a través de la fibra óptica y recogidas por el detector que las reconvierte en señales eléctricas siendo finalmente amplificadas y/o procesadas por el circuito de salida.

Para convertir un sistema de transmisión de señales luminosas en un sistema de comunicación, deberán ser incluidos el modulador y demodulador respectivo.

Los sistemas que operan actualmente incorporan la detección directa de una señal que moduló en intensidad a la portadora de la fuente láser; el detector se limita a obtener una fotocorriente a partir de la luz modulada incidente, por lo que esta corriente será proporcional a la potencia recibida, y corresponderá a la forma de onda de la moduladora.

En el caso más común, el de la modulación directa o de intensidad luminosa, la potencia óptica emitida es controlada por la corriente inyectada junto con la corriente de polarización. En el caso de modulación coherente algún parámetro (fase, frecuencia, amplitud o polarización) del campo emitido, es modulado por la información.

2.5.1.2 Modulación de Intensidad (IM)

Dentro del sistema de modulación se pueden distinguir las siguientes formas de modulación que usa un determinado parámetro que caracteriza el envío de información directamente por el láser:

- ❖ modulación on-off keying (OOK)
- ❖ modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)
- ❖ modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)

Como en definitiva es el láser el que finalmente será modulado se le debe prestar especial atención. En el láser las pérdidas ópticas son compensadas con la amplificación coherente de la luz en el interior del mecanismo de bombeo a través de emisión estimulada (el fotón posee longitud de onda y fase en concordancia con las ya presentes).

Para producir este efecto el diodo láser debe ser polarizado con cierta corriente mínima, esta corriente recibe el nombre de corriente de umbral (I_{th}), la cual provee suficiente ganancia óptica para compensar las pérdidas de la cavidad óptica resonante. La operación por debajo de I_{th} provoca que el diodo láser emita luz incoherente, como en el caso de los LED. Además provoca la ocurrencia de oscilaciones en amplitud del pulso óptico llamada oscilación de relajación.

Por sobre el umbral, el diodo láser funciona como un oscilador coherente y emite potencia óptica con un agudo incremento de la misma conforme aumenta la corriente de conducción, como se indica en la **figura 2.50**.

La corriente de umbral es dependiente de la temperatura del diodo láser, del ancho de su zona activa y de diversos diseños de construcción.

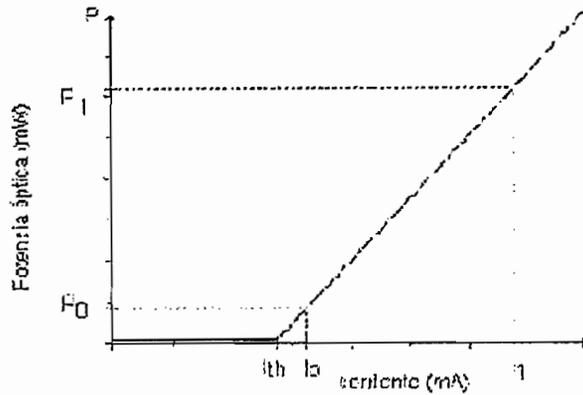


Figura 2.50 Curva característica del diodo láser

De la figura anterior se tiene que:

$$I_1 = I_{bias} + I_m$$

$$I_0 = I_{bias}$$

donde I_{bias} es la corriente de polarización e I_m es la corriente de modulación.

Bajo esta modulación, la frecuencia del diodo láser experimenta una variación indeseada en frecuencia (llamado chirping), que esta asociada con la modulación del diodo láser por la variación de la corriente inyectada. Ella es causada por la dependencia del índice de refracción del material semiconductor de la región activa con la densidad de portadores inyectados. El aumento de la corriente inyectada hace crecer la densidad de portadores, lo que hace caer el índice de refracción y, por lo tanto, la longitud de onda emitida.

Como los desvíos de frecuencia acompañan la densidad de portadores, que es fuertemente sujeta a transientes (transiciones: subidas y bajadas), hay que distinguir entre el chirping básico o adiabático, el que está asociado a la duración completa del pulso óptico, y el chirping transiente, el que está asociado a los transientes (subida y bajada) del pulso.

La figura 2.51 muestra la forma esquemática del efecto de estos dos componentes del chirping sobre el pulso óptico que se propaga por la fibra. La degradación más importante es la del chirping transiente, que hace que la parte precursora del pulso se adelante en la propagación, y la parte final se atrase, resultando en un pulso menos energético.

Este efecto puede disminuir la capacidad de los sistemas de alta velocidad de transmisión. Se han propuesto varias técnicas para minimizar el chirp, algunas de estas son:

- Polarizar el láser sobre el umbral
- Acoplar el láser a una cavidad externa
- Modular el láser externamente
- Compensar la señal en recepción a través de ecualización óptica o eléctrica.

Este chirping en frecuencia, asociado con la dispersión cromática de la fibra óptica monomodo, es causa de una severa degradación sistémica conocida con el nombre de *Crosstalk*.

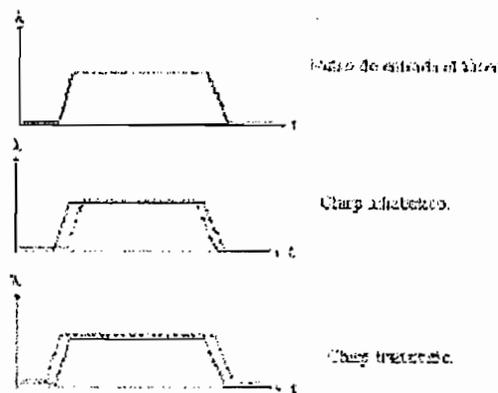


Fig 2.51 Efectos dispersivos de chirp sobre el pulso de salida del diodo láser.

2.5.2 METODOS DE DETECCIÓN

2.5.2.1 Detección Directa

Para sistemas de detección directa, la señal de modulación y detección puede tomar una de las formas mostradas en la **figura 2.52**. En la modulación ON-OFF (OOK), algunas veces llamada modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), el láser es encendido y apagado modulándolo directamente, polarizando la corriente cerca del umbral ("0" bit) o bien sobre el umbral ("1" bit). En la recepción las decisiones se pueden basar puramente en la energía que es recibida durante el período de bit (ver figura 2.53). Toda la información de frecuencia y fase es ignorada. Los sistemas de modulación directa operan entre 10 y 15 dB, en razón que el ruido térmico es normalmente mayor que el ruido balístico, producido por los fotones que llegan al fotodetector. El comportamiento de detección directa puede ser mejorado a través del uso de preamplificadores ópticos.

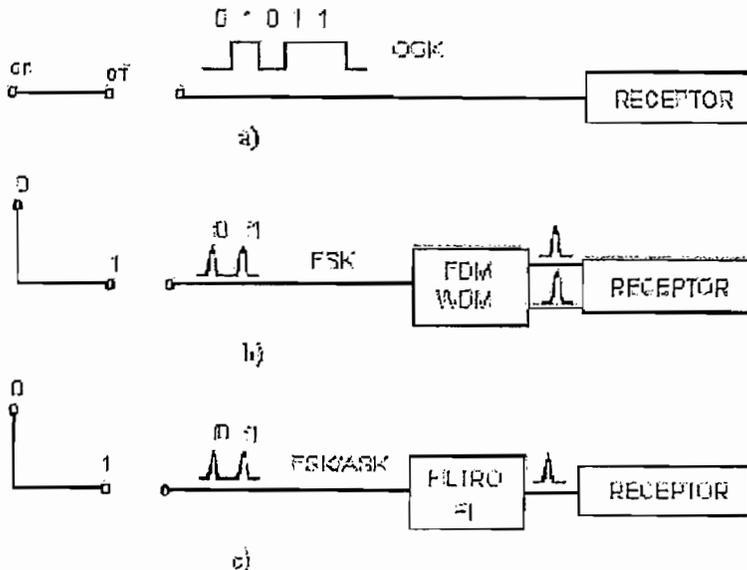


Fig 2.52 Esquemas de modulación.

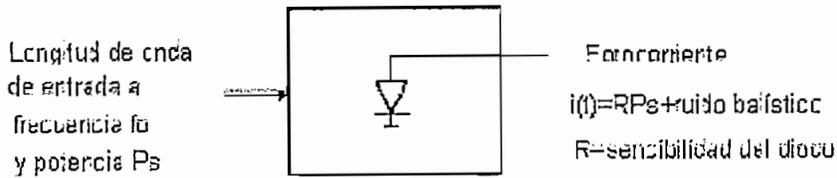


Fig 2.53 Esquema de detección directa

2.5.2.1.1 Ventajas de la detección directa

El criterio de detección es el mismo tanto si la señal es analógica como digital. La única diferencia es de orden cuantitativo. En el primer caso se requiere una relación señal ruido más elevada que con las señales digitales, por lo que la separación entre repetidores será inferior que la obtenida con un sistema digital del mismo ancho de banda.

También aquí, como con el empleo de la modulación en el caso de los emisores, se puede considerar el por qué no se emplea un sistema de detección heterodina, que mejora la selectividad del receptor y evita el peligro de aparición de autooscilaciones en los amplificadores: requeriría dos láseres estrictamente monomodales actuando de osciladores locales, uno en el transmisor y otro en el receptor.

A esta exigencia se une la estabilización de la frecuencia de trabajo, difícil en todos los casos por la tendencia a la deriva de los láseres frente a la temperatura.

2.5.2.2 Detección Coherente

En recepción coherente, la señal óptica modulada que llega al receptor se suma a la señal del oscilador local antes de la fotodetección, la composición de las dos reproduce la señal primitiva

Existe dos posibilidades de detección coherente: homodina y heterodina. Si la frecuencia del oscilador local es ligeramente diferente de la señal entrante

(detección heterodina), entonces la corriente resultante en la salida del fotodetector es centrada en alguna frecuencia pasabanda no nula, llamada de frecuencia intermedia (IF), con valores típicos de 0.1 – 5 GHz. En detección coherente homodina existe una conversión directamente a banda base.

Desde el punto de vista ideal, el comportamiento de un receptor coherente solo es limitado por el ruido balístico (producido por los fotones que llegan al fotodetector), considerando que si un oscilador tiene potencia suficientemente grande, la potencia de ruido balístico será mayor que la potencia del ruido térmico del receptor.

Finalmente la técnica de modulación y detección heterodina aún no está disponible comercialmente, por lo tanto, actualmente se ha adoptado el sistema de modulación de intensidad y detección directa.

2.5.2.2.1 Ventajas de la detección coherente

Teniendo presente los principios básicos de la detección coherente vistos anteriormente en las cuales la información de señal esta localizada en amplitud, en fase o en frecuencia instantánea de portadora, es interesante mostrar las ventajas y desventajas de estos sistemas en relación a la detección directa.

Sensibilidad.

La primera gran ventaja de los sistemas ópticos de detección coherente, en relación a la directa, es la mejor sensibilidad del receptor, que es definida como el nivel mínimo de señal, el cual puede ser detectado para un determinado nivel de calidad. Esto se consigue debido a los siguientes factores:

- Un factor de la mejora de la sensibilidad es intrínseco a la mayor o menor coherencia del esquema de detección, donde el aumento de sensibilidad en relación a los sistemas directos varia entre 3 y 9 dB.

- Los receptores heterodinos OOK y FSK tienen, idealmente, una sensibilidad de 36 fotones por bit, aproximadamente la misma que un receptor OOK con detección directa y preamplificador óptico.

Selectividad.

Otra ventaja de un sistema heterodino u homodino es el aumento de la selectividad en frecuencia, entendiéndose por selectividad a la habilidad de un receptor para detectar un determinado rango de frecuencias, al mismo tiempo que rechaza varias otras. La selectividad, en los sistemas ópticos coherentes, es dado por las propiedades espectrales del filtro de frecuencia intermedia.

2.5.3 MULTIPLEXACIÓN

La fibra óptica es un medio de transmisión que presenta un ancho de banda que excede tanto la velocidad a la cual puede ser accesada por los medios actuales, como la tasa de bit a la que será usada.

La fibra óptica operando en la tercera ventana (1.3 – 1.6 μm) presenta atenuaciones en la transmisión menores a 0.2 dB/Km, haciendo posible implementar sistemas de transmisión de larga distancia cuya separación entre repetidores puede alcanzar los 200 Km reduciendo de esta forma los costos y complejidad del sistema.

En esta región de bajas pérdidas una fibra óptica monomodo posee un ancho de banda superior a 25 THz (25×10^{12} Hz). Se puede usar este extenso ancho de banda para realizar funciones orientadas a redes y sistemas, tales como enrutamiento, conmutación y servicios.

Una forma práctica de usar la capacidad de transmisión de la fibra óptica es dividiéndola en múltiples canales, a través de diferentes longitudes de onda (WDM: Multiplexación por división de longitud de onda) o haciendo uso de diferentes frecuencias (FDM: Multiplexación por división de frecuencia), siendo la

principal diferencia entre uno y otro la separación entre dichos canales en donde los sistemas FDM es del orden de los GHz y en WDM es de los THz.

Las redes FDM/WDM pueden ser implementadas haciendo uso de las topologías convencionales (estrella, bus y ring).

2.5.3.1 Jerarquías Digitales de Multiplexación

2.5.3.1.1 Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH)

La jerarquía digital plesiócrona establece diferentes ordenes o niveles de velocidad en el que cada nivel combina un número de señales digitales cada una con velocidades específicas. Las señales que forman los niveles de la jerarquía provienen de fuentes con reloj diferente (y por ende con diferencias de fase) enmarcados dentro de límites específicos.

Antes del surgimiento de la jerarquía digital sincrónica (SDH), las transmisiones se realizaban utilizando la jerarquía digital plesiócrona (PDH), la que se basa en hacer una serie de multiplexaciones de señales provenientes de fuentes distintas, para así formar una señal común con una velocidad superior.

Haciendo determinada cantidad de multiplexiones se van logrando las diferentes jerarquías propias de PDH. Dichas jerarquías, están estandarizadas, pero estos estándares no son iguales en todo el mundo.

Existen tres jerarquías digitales plesiócronas, cada una de las cuales define una estructura de trama:

NAS (North American System): múltiplex primario con velocidad de bits de 1544 Kbps y 24 canales, agrupando cuatro tributarios para subir la jerarquía. Para

realizar la técnica de cuantificación se emplea la ley μ^{26} . Es usada en Norteamérica y el Japón.

NTT (Nippon Telegraph Telephone): velocidad de múltiplex primario de 1544 Kbps y 24 canales, con diferente número de tributarios agrupados para subir en jerarquía. Emplea la ley de cuantificación μ . Se usa en Japón.

CEPT (Conferencia Europea de Administración postal y telecomunicación): la mínima velocidad de la jerarquía es de 2048 Kbps, con 30 canales, agrupa cuatro tributarios para formar cada nivel de la jerarquía. Emplea la ley de cuantificación A^{27} . Es usada en Europa, Asia y Sudamérica a excepción de Brasil.

Jerarquía Digital PDH (Norteamericana, Japonés)

<i>Nombre</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Equivalencia</i>
DS-0	64 Kbps	
DS-1 (T1)	1.54 Mbps	24 DS-0
DS-3 (T3)	44.73 Mbps	28 DS-1
DS-4	274.17 Mbps	6 DS-3

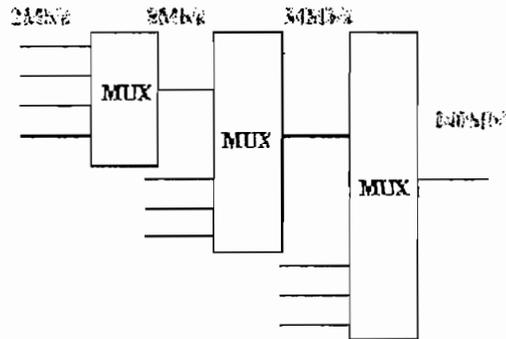
Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH Europea)

<i>Nombre</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Equivalencia</i>
DS-0	64 Kbps	
E1	2.04 Mbps	30 DS-0
E2	8.19 Mbps	4 E1
E3	34.36 Mbps	16 E1 (4 E2)
E4	139.26 Mbps	4 E3

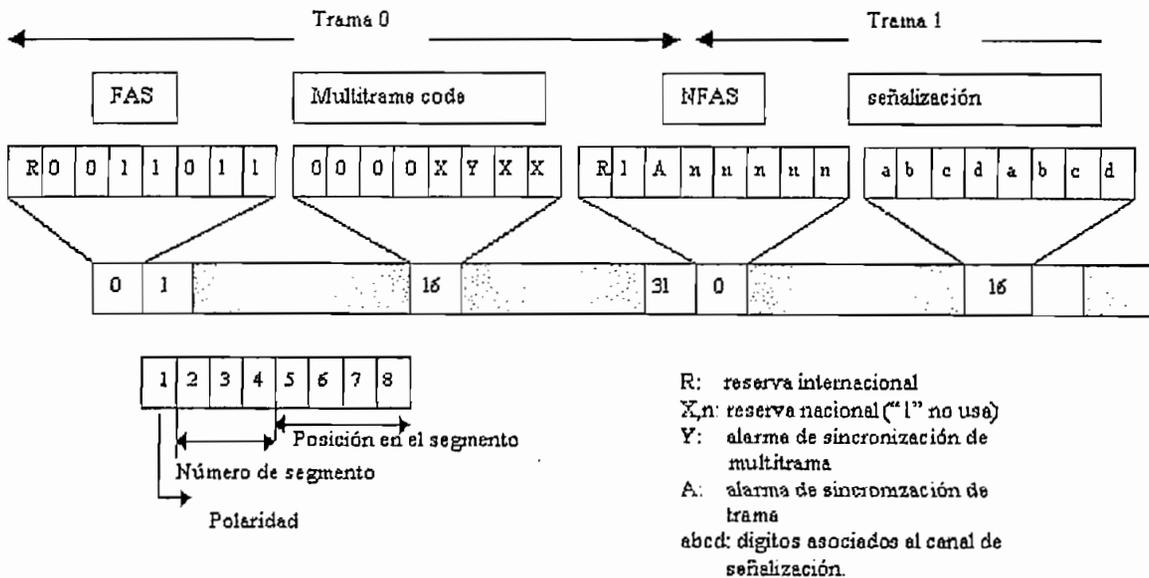
²⁶ Ley μ : es una ley de compresión de segmentos de recta la cual tiene 15 segmentos que reproducen con aproximación una curva logarítmica. (descrita en la recomendación G.711).

²⁷ Ley A: ley de compresión de segmentos de recta, tiene 13 segmentos que reproducen con aproximación una curva logarítmica. (descrita en la recomendación G.711).

A estas velocidades, por ejemplo en el caso de las Europeas, se llega haciendo una serie de multiplexiones, las cuales se realizan tomando cuatro líneas de la jerarquía inmediata inferior, y multiplexando las mismas en tiempo se llega a la siguiente jerarquía. El siguiente grafico muestra como se realizan las sucesivas multiplexiones hasta llegar a la jerarquía más alta que se encuentra estandarizada.



La estructura de trama según la CEPT para la multiplexación a 2048 Kbps, se indica a continuación:



La multiplexión, en la jerarquía PDH, se realiza utilizando el método de entrelazado bit a bit. Esto quiere decir que la señal de entrada de un multiplexor aparecerá solamente cada 4 bits de la señal de salida del mismo.

En la multiplexión de la jerarquía PDH, se diferencian dos casos:

- a) Las señales originales son sincrónicas, por ejemplo tienen exactamente el mismo reloj. Esto es válido para un sistema PCM30, donde el reloj de cada señal de 64Kb/s y de 2Mbps son derivadas a partir del mismo reloj central. En este caso el proceso de multiplexión se reduce a una simple conversión paralelo - serie de las palabras codificadas de 8 bits.
- b) Las señales originales no son sincrónicas, por ejemplo sus relojes provienen de distintos lugares. Esto es válido para la multiplexión de señales de salida originadas por varios sistemas PCM30 cuyos relojes son generados en cada uno de los sistemas en una forma autónoma. Aquí es necesario tomar medidas apropiadas con el fin de compensar las diferencias de relojes.

2.5.3.1.2 *Jerarquía Digital Sincrónica (SDH)*

En el año 1985 la empresa Bell Core, le hace una propuesta al ANSI de estandarizar las velocidades mayores a 140Mbps.

En 1986, la Bell Core, y La AT&T, proponen al CCITT, posibles velocidades de transmisión para que las mismas sean estandarizadas, cada una de estas empresas propone diferentes velocidades transmisión posibles.

Recién en el año 1988 se produce la primera regulación de la Jerarquía Digital Sincrónica (JDS), o más conocida por sus siglas en la lengua inglesa Synchronous Digital Hierarchy (SDH), estándar para redes de telecomunicación de "alta velocidad y alta capacidad ". La CCITT saca entonces, en su "Serie azul", las recomendaciones G707,G708 y G709 la primera regulación de esta forma de transmisión.

Desde 1988 al día de hoy, han habido 6 modificaciones de las recomendaciones, estando vigente hoy en día solamente la recomendación G707.

Este es un sistema de transporte digital realizado para proveer una infraestructura de redes de telecomunicaciones más simple, económica y flexible.

Las viejas redes fueron desarrolladas en el tiempo en que las transmisiones punto a punto eran la principal aplicación de la red. Hoy en día los operadores de redes requieren una flexibilidad mucho mayor.

La tecnología SDH, en relación a la PDH ofrece las siguientes ventajas:

- **Altas velocidades de transmisión.**- Los modernos sistemas SDH logran velocidades de 10 Gbps. SDH es la tecnología mas adecuada para los backbones, que son realmente las superautopistas de las redes de telecomunicaciones actuales.
- **Función simplificada de inserción/extracción.**- Comparado con los sistemas PDH tradicionales, ahora es mucho más fácil extraer o insertar canales de menor velocidad en las señales compuestas SDH de alta velocidad. Ya no hace falta demultiplexar y volver a multiplexar la estructura plesiócrona, procedimiento que en el mejor de los casos era complejo y costoso. Esto se debe a que en la jerarquía SDH todos los canales están perfectamente identificados por medio de una especie de "etiquetas" que hacen posible conocer exactamente la posición de los canales individuales.
- **Alta disponibilidad y grandes posibilidades de ampliación.**- La tecnología SDH permite a los proveedores de redes reaccionar rápida y fácilmente frente a las demandas de sus clientes. Por ejemplo, conmutar las líneas alquiladas es sólo cuestión de minutos. Empleando un sistema de gestión de redes de telecomunicaciones, el proveedor de la red puede usar elementos de redes estándar controlados y monitorizados desde un lugar centralizado.
- **Fiabilidad.**- Las modernas redes SDH incluyen varios mecanismos automáticos de protección y recuperación ante posibles fallas del sistema.

Un problema en un enlace o en un elemento de la red no provoca el colapso de toda la red, lo que podría ser un desastre financiero para el proveedor. Estos circuitos de protección también se controlan mediante un sistema de gestión.

- **Plataforma a prueba de futuro.-** Actualmente, la tecnología SDH es la plataforma ideal para multitud de servicios, desde la telefonía tradicional, las redes RDSI o la telefonía móvil hasta las comunicaciones de datos (LAN, WAN, etc.) y es igualmente adecuada para los servicios más recientes, como el video bajo demanda (VOD) o la transmisión de video digital vía ATM (Modo de transferencia asíncrono)

Características de la tecnología SDH

- ❖ Velocidad básica 155Mbps (STM-1)
- ❖ Técnica de multiplexado a través de punteros
- ❖ Estructura modular: A partir de la velocidad básica se obtienen velocidades superiores multiplexando byte por byte varias señales STM-1. Las velocidades multiplexadas, a diferencia de PDH, son múltiplos enteros de la velocidad básica
- ❖ A través del puntero, se puede acceder a cualquier canal de 2Mbps
- ❖ Posee gran cantidad de canales de overhead que son utilizados para supervisión, gestión, y control de la red.

Trama STM-1

La jerarquía STM-1 es la menor velocidad prevista para la transmisión a través de un enlace de SDH, es decir es la jerarquía básica.

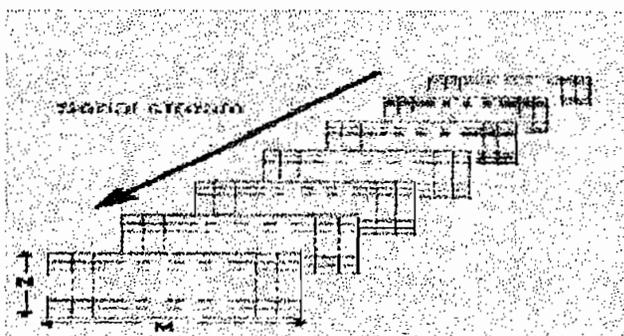
La STM-1 tiene una estructura de trama que se conforma de 2430 bytes en serie, que por lo general se ilustra en forma de matriz para hacer más cómoda su representación, quedando entonces una estructura bidimensional de 9 reglones, con 270 bytes por reglón. Esta matriz debe ser recorrida en izquierda a derecha, y en sentido descendente, para así ir siguiendo la secuencia en serie.

La estructura de una trama STM-1, se muestra a continuación:



La duración de transmisión de cada trama es de 125 μ s, la cual corresponde a una frecuencia de repetición de trama de 8000 Hz. La capacidad de transmisión de un byte individual es de 64Kbps.

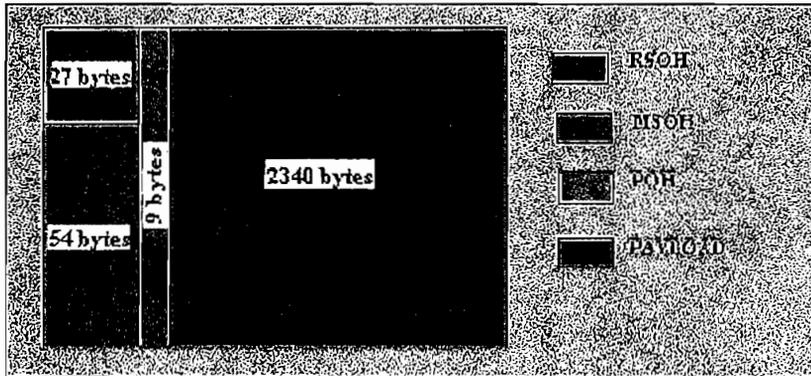
La transmisión de las matrices sucesivas, sigue una secuencia en serie, es decir cuando se termina de recorrer una matriz, comienza la siguiente. La siguiente ilustración muestra esquemáticamente como se van transmitiendo las matrices.



Transmisión de las matrices sucesivas

La STM-1 está conformada por tres bloques: La Sección Overhead (SOH), el puntero (PTR), y la señal útil o comúnmente llamada payload.

El bloque SOH, se subdivide en dos secciones: la *Multiplexer section overhead* (MSOH) y *Regenerator section overhead* (RSOH). En el siguiente gráfico, se muestran las diferentes secciones dentro de la trama de SDH.



Secciones de la trama STM-1

Regenerator Section Overhead (RSOH)

Esta sección está destinada a transferir información entre los elementos regeneradores. Estos regeneradores tendrán acceso a la información que viene en los bytes del RSOH.

Las funciones básicas de esta sección son las siguientes:

- Chequeo de paridad
- Alineación de la trama
- Identificación de la STM-1
- Canales destinados a los usuarios (sin fines específicos)

- Canales de comunicación de datos
- Canales de comunicación vocales

Multiplexer Section Overhead (MSOH)

Esta sección provee las funciones necesarias para monitorear y transmitir datos. Las funciones básicas de esta sección son:

- Chequeo de paridad
- Punteros de paridad
- Conmutación automática a la protección
- Canales de comunicación de datos
- Canales de comunicación vocales

Path Overhead (POH)

Esta sección esta construida por 9 bytes, los cuales ocupan la primer columna de la STM-1, los mismos están destinados a manejar toda la información concerniente al camino por el cuál circulará la comunicación. Las funciones básicas de esta sección son las siguientes:

- Mensajes de la trayectoria de camino
- Chequeo de paridad
- Alarmas e información de performance
- Indicación de multitrama para las unidades tributarias

- Conmutación por protección de camino

COMPONENTES DE UNA RED SDH

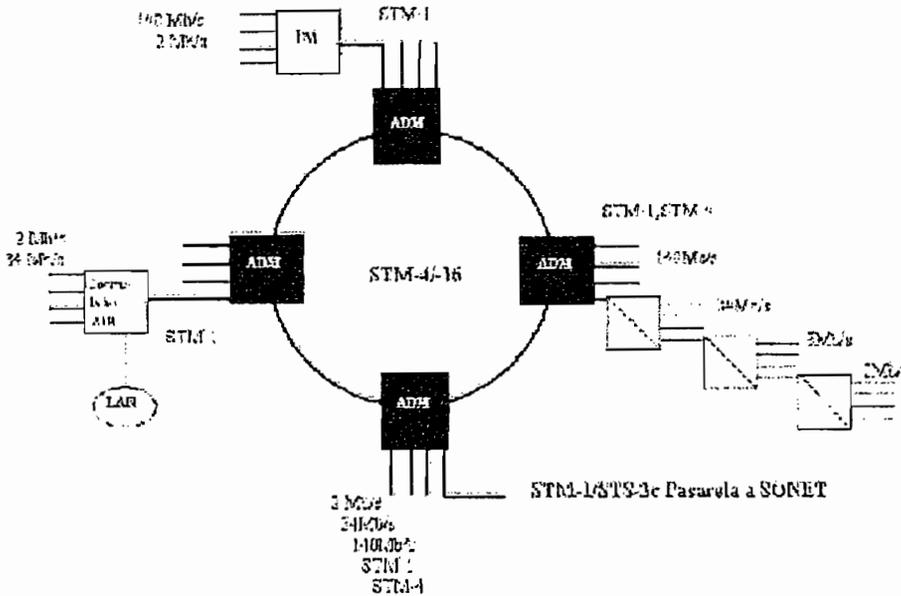


Figura 2.54 Diagrama esquemático de redes SDH

La figura 2.54 muestra un diagrama esquemático de una estructura SDH en anillo con varias señales tributarias. La mezcla de varias aplicaciones diferentes es típica de los datos transportados por la red SDH.

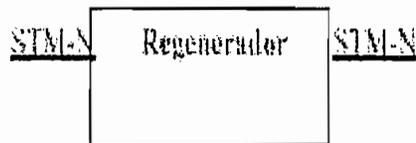
Las redes síncronas deben ser capaces de transmitir las señales plesiócronicas y, al mismo tiempo, ser capaces de soportar servicios futuros como ATM. Todo ello requiere el empleo de distintos tipos de elementos de red.

Las redes SDH actuales están formadas básicamente por cuatro tipos de elementos: Regeneradores, Multiplexor Terminal, Multiplexor add/drop, Transconectores Digitales. La topología (estructura de malla o de anillo) depende de el proveedor de la red.

Regeneradores.-

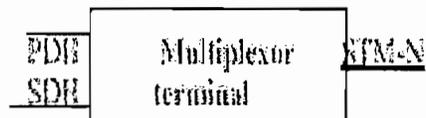
Los regeneradores se encargan de regenerar el reloj y la amplitud de las señales de datos entrantes que han sido atenuadas y distorsionadas por la dispersión y otros factores. Obtienen sus señales de reloj del propio flujo de datos entrante.

Los mensajes se reciben extrayendo varios canales de 64 kbps de la cabecera RSOH. También es posible enviar mensajes utilizando esos canales.



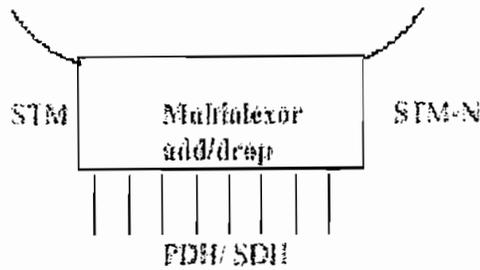
Multiplexor Terminal.-

Se emplean para combinar las señales de entrada plesiócronicas y síncronas en señales STM-N de mayor velocidad.



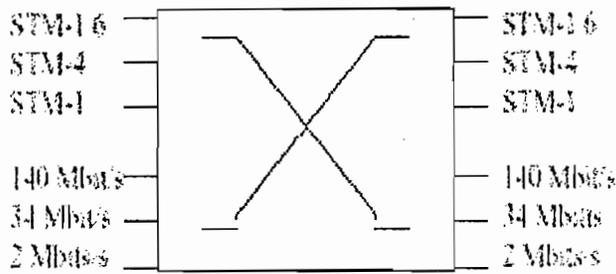
Multiplexores add/drop (ADM).-

Permiten insertar o extraer señales plesiócronicas y síncronas de menor velocidad binaria en el flujo de datos SDH de alta velocidad. Gracias a esta característica es posible configurar estructuras en anillo, que ofrecen la posibilidad de conmutar automáticamente a un trayecto de reserva en caso de fallo de alguno de los elementos del trayecto.



Transconectores digitales (DXC).-

Mientras los ADMs y los Multiplexores Terminales recogen y distribuyen los flujos en la red SDH, los DXC funcionan como nodos para enrutar dichos flujos.



2.5.3.2 Multiplexación por División de Longitud de Onda

En la actualidad, la mayoría de sistemas de transmisión óptica, operan a velocidades de hasta 2.5 Gbps. Aun a estas velocidades impresionantes, las redes de comunicación se han superpoblado de tráfico de diferentes naturalezas, Internet, Videos, Datos, LANs, Fax, y Voz, por su constante demanda y crecimiento. Por ello, se necesita una solución eficiente que les garantice flexibilidad de capacidad sin necesidad de redimensionar en amplio grado y a costos muy altos su infraestructura existente.

La nueva tecnología de las redes de transmisión: la WDM (Multiplexión por División de Longitud de Onda) a lo largo de los últimos años, diversos factores han propiciado el importante desarrollo tecnológico de todos los equipos y servicios relacionados con las telecomunicaciones: grandes avances técnicos, liberación del sector, crecimiento de la red Internet. Las transformaciones

derivadas de todos estos factores están convirtiendo nuestra era en la era de la información y las comunicaciones. Esta revolución de las telecomunicaciones avanzadas, conocida por la Sociedad de la información como " Autopista de la Información " o " Aldea Global ", descentraliza y flexibiliza la economía y transforma radicalmente la sociedad.

Para que esta revolución siga, debe ser apoyada por un mejoramiento de las infraestructuras que soportan servicios de multimedia de diversas índoles. En efecto, el éxito de esta revolución global sin precedentes, depende en gran medida de la instalación de redes de gran capacidad y bajo costo, siendo la fibra óptica el medio elegido para los sistemas de telecomunicación, puesto que es el medio con menor ruido y su capacidad de transmisión aumenta en un 100% anual.

La Multiplexión por Longitud de Onda (WDM), usada en conjunto con transmisión de longitud de onda constituye un mecanismo para transporte de información con futuras redes totalmente ópticas.

El uso de la WDM, nos a proporcionado una mejor utilización de las redes de comunicación, ya que nos proporciona un aumento en la capacidad de procesamiento en los nodos de conexión cruzados a través de transmisión por compresión de onda para caminos ópticos eliminando el problema de cuello de botella durante un procesamiento eléctrico.

La multiplexación por división de longitud de onda tiene su origen en la posibilidad de acoplar las salidas de diferentes fuentes emisoras de luz, cada una con una longitud de onda diferente sobre una misma fibra óptica. Después de la transmisión a través de la fibra, las señales a cada longitud de onda diferentes pueden ser separadas entre sí hacia diferentes detectores en su extremo final. El componente encargado de inyectar las distintas fuentes sobre la misma fibra óptica es el multiplexor, y el encargado de separarlas es el demultiplexor.

Otros dos importantes tipos de multiplexión son la TDM (Multiplexión por División de Tiempo) y la FDM (Multiplexión por División de Frecuencia). En TDM se segregan muestras de cada señal en ranuras temporales que el receptor puede seleccionar mediante un reloj correctamente sincronizado con el transmisor; y en FDM cada señal se transforma en una frecuencia subportadora que puede ser filtrada por el receptor.

Si bien la FDM y la TDM son sistemas de multiplexión incompatibles, la WDM puede hacer uso de señales previamente multiplexadas mediante las técnicas FDM y TDM en el dominio eléctrico. Por ello la WDM es, actualmente, la mejor solución a los límites de capacidad alcanzados recientemente con la TDM en el dominio eléctrico.

Actualmente la WDM, que también puede verse como una FDM óptica, es la técnica idónea para aprovechar el gran ancho de banda ofrecido por la fibra óptica. Cabe esperar por tanto, que la técnica de Multiplexión Óptica del futuro, cuando se resuelvan las limitaciones impuestas por la dispersión en la fibra, sea la TDM óptica.

En efecto, tras la evolución de las comunicaciones analógicas a las digitales, y de PDH y SDH, el objetivo está en pasar de SDH a WDM. SONET en Norte América y SDH en Europa, son los estándares de transmisión digital a larga distancia que resuelven los problemas de gestión y mantenimiento de los equipos, así como de la inserción y la extracción de las señales de jerarquías inferiores de menor capacidad, presentados por su predecesor PDH.

LA tecnología de transporte SDH permiten diferentes tasas de bit o STM, desde STM-1 (155 Mbps) hasta STM-64 (10 Gbps). La protección se ofrece a través de topologías en anillo, capaces de reconfigurarse del fallo de un enlace a menos de 50 metros.

Otras características importantes de SDH, son la compatibilidad con la tecnología de transporte precedentes, es decir, PDH, la posibilidad de transportar nuevos

formatos de señales como ATM, estandarización mundial, monitorización de errores y su potente funcionalidad de administración.

Si consideramos la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits típica utilizada y el factor de multiplexación ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexación, se puede ver una clara evolución:

Inicialmente la transmisión digital era capaz de soportar 2 Mbps (en el primer nivel de multiplexación o multiplexores básicos), teniendo 64 Kbps cada una de las señales tributarias. Estos 64 Kbps conforman la tasa de bit de las redes telefónicas tradicionales.

El siguiente paso fue mejorar la eficiencia en la transmisión, permitiendo tasas de bit más altas introduciendo cross-connects (principalmente manuales pero en algunos países, como en Francia e Inglaterra, automáticos). La señal agregada pasó a tener una capacidad de 140 Mbps y un factor de multiplexación de 2 Mbps. Por supuesto también hay tasas de bit intermedias, tales como 8 Mbps o 34 Mbps. Esta tecnología es PDH.

Una paso mayor, que está de hecho en desarrollo en todos los países del mundo, es la introducción de SDH. Actualmente el factor de multiplexación es de 150 Mbps y es posible una capacidad de 10 Gbps.

Una nueva etapa está en el uso generalizado de la WDM, que aún no ha sido totalmente estandarizado debido la rápida evolución de estos equipos, lo que imposibilita producir recomendaciones a tiempo y constituye una clara desventaja frente a SDH. Ya no se está lejos de alcanzar una capacidad de 320 Gbps (32 longitudes de onda), con un factor de multiplexación de 10 Gbps.

El paso siguiente se dará posiblemente en torno al año 2010 y requerirá grandes avances que superen las limitaciones de la WDM, consiguiendo incrementar el factor de multiplexación a 320 Gbps con una capacidad total de 10 Tbps, o quizás la combinación de WDM con el principio de TDM en el dominio óptico.

En efecto, la mejor técnica a corto plazo para llegar a aprovechar todo el ancho de banda ofrecido por una fibra óptica, sin necesidad de cambiar todos los equipos y enlaces existentes, es la WDM. La tecnología WDM esta siendo, ampliamente utilizada en redes de cable de fibra óptica submarinos internacionales, consiguiendo unas capacidades y una funcionalidad inimaginables hace tan sólo cinco años.

Aplicaciones de la WDM

Sistemas transoceánicos transportando más de 16 longitudes de onda ya son posibles a lo largo de distancias de 8.000 Km. Estos sistemas transportan un STM-16 (2,5 Gbps) en cada longitud de onda, soportando una capacidad máxima de 40 Gbps por fibra. También son posibles 6 canales a 5 Gbps sobre distancias similares. El principal reto en el diseño de estos sistemas es cómo conseguir un mayor número de longitudes de onda sobre distancias de alrededor de 12.000 Km. Se debe tener un especial cuidado seleccionando las características de dispersión de cada fibra y el espaciado entre longitudes de onda. En un futuro próximo se podrá incrementar la capacidad a un STM-64 (10 Gbps) por longitud de onda. Además, la seguridad y disponibilidad, son requerimientos absolutamente necesarios de las redes submarinas, por lo que muchos tramos utilizan componentes redundantes y topologías en anillo.

Actualmente hay varias redes transoceánicas en diseño y construcción. Una de estas redes es Africa ONE que fue el primer proyecto que planeó utilizar tecnología WDM, concebida como un anillo de cable de fibra óptica submarino dando acceso a más de 2,5 Gbps a toda la costa africana sobre más de 40.000 Km.

Otro proyecto es Sea-Me-We-3, el cual será la primera red submarina que utilice encaminadores de longitudes de onda y multiplexores add/drop. Esta red será instalada con una capacidad superior a 8 longitudes de onda en cada fibra

transportando cada fibra un STM-16. Sea-Me-We-3 conectará más de una docena de países entre el Sur y mitad Este de Asia y el Este de Europa.

Los tres sistemas WDM conocidos por Atlantis-2, Columbus-3 y Americas-II, formarán un anillo alrededor del Océano Atlántico Sur, conectando países de cuatro continentes. A diferencia de las redes Africa ONE y Sea-Me-We-3, permitirán que la capacidad y el encaminamiento del tráfico puedan ser cambiadas una vez que el sistema esté operativo, reduciendo el coste inicial por utilizar menos longitudes de onda de las que podrá soportar.

La evolución esperada para las nuevas arquitecturas de red óptica WDM se espera que sea similar a la observada en las redes SDH.

2.5.3.3 Método de selección del canal

En los sistemas FDM/WDM es posible sintonizar el transmisor o receptor o ambos. Como criterio para escoger una de las posibilidades anteriores, se puede considerar el tipo de sistema, su aplicación y el tipo de los componentes usados en estos sistemas. Otro criterio de selección se refiere al escoger el método de acceso al medio. Si los transmisores son sintonizables y los receptores son de sintonía fija (figura 2.55) se produce colisión si dos transmisores transmiten simultáneamente al mismo receptor. En el caso de tener transmisores de sintonía fija y receptores sintonizables (figura 2.56), se evitan las colisiones, ya que los transmisores transmiten a frecuencias diferentes y no interfieren unos con otros; una ventaja adicional es que en este caso es posible uniones multicast (envío de información a múltiples receptores); donde se introduce un costo extra, ya que es necesario un control adicional pues, los receptores deben informar qué canal están recibiendo, para lo cual se debe usar un canal de control separado.

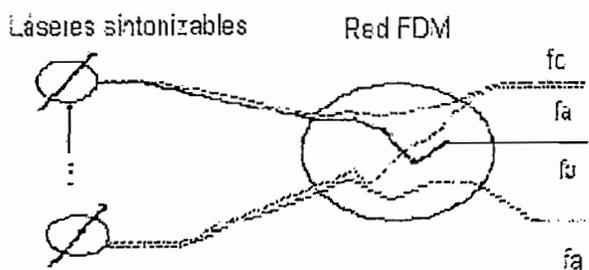


Figura 2.55 Transmisores sintonizables y receptores fijos.

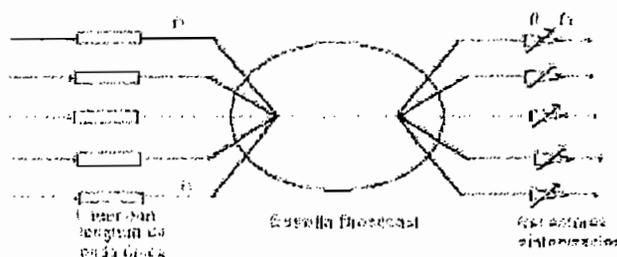


Figura 2.56 Transmisores fijos y receptores sintonizables.

El caso de transmisores y receptores sintonizables no ofrece mayores ventajas, a no ser que varias estaciones estén compartiendo un único canal, en este caso el problema de control es más complicado.

En general, la configuración esquemática de receptores selectivos de canal, con FDM/WDM, se muestra en la figura 2.57. Hay dos métodos de selección de canales para señales ópticas multiplexadas:

- ❖ Filtración óptica con un filtro óptico pasivo, tal como el filtro periódico (figura 2.57a), o el filtro óptico sintonizable.
- ❖ Filtración de banda IF por detección heterodina óptica, el cual se muestra en la figura 2.57b.

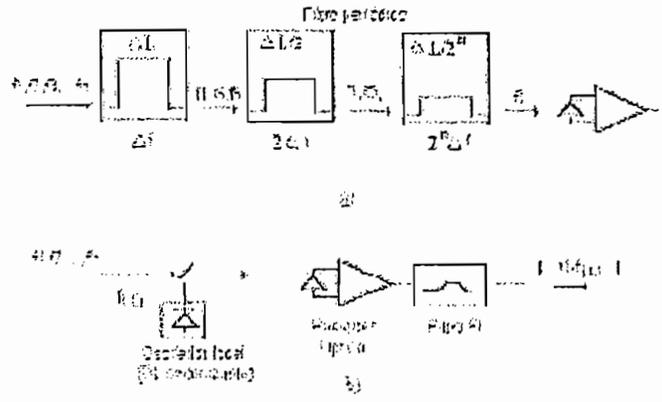


Figura 2.57 Diagrama esquemático de configuración de receptores selectivos de canal a) Método de filtración óptica directa. b) Método heterodino óptico.

En el método de filtrado óptico, es posible usar detección directa o detección heterodina. El esquema de detección por filtración directa óptica es simple y económico porque no necesita diodos láseres (LD) sintonizables u otros dispositivos complejos como lo es para la detección heterodina óptica.

La figura 2.56a muestra un receptor de canal selectivo construido por filtros ópticos conectados en serie y detección directa.

El otro esquema, que representa una importante tendencia en el desarrollo de sistemas de transmisión por fibras ópticas es el de detección coherente. Estos sistemas se basan en el uso de técnicas de modulación de frecuencia o de fase de una portadora luminosa coherente: homodina o heterodina. La figura 2.56b presenta el diagrama esquemático de un sistema coherente con detección heterodina.

2.5.3.4 Desempeño de un sistema FDM/WDM óptico

2.5.3.4.1 Penalidad del sistema

Dos tipos de interferencia son introducidas por el sistema bajo consideración: Interferencia intra-canales e interferencia entre canales. La interferencia intra-canal (o interferencia intersimbólica: ISI) ocurre debido a las distorsiones que la señal sufre por la dispersión cromática de la fibra óptica (ensanchamiento de los pulsos).

La interferencia entre canales, o **Crosstalk**, es causada por el incremento de pérdidas de canales adyacentes debido al incremento del ancho de banda del chirp (variación de la frecuencia propia de la modulación de intensidad).

En general es difícil determinar la penalidad de potencia exacta para un sistema dado sin hacer alguna suposición. Existe una variedad de técnicas de aproximación para estimar el efecto de la interferencia intersimbólica.

Una aproximación que no requiere estas suposiciones usa el criterio de apertura del ojo. El diagrama de ojo es generado por la superposición de todas las posibles secuencias de M-bits de salida simuladas. En orden a observar la dependencia de la frecuencia chirp del diagrama, M tiene que ser más grande que el contador de la memoria por canal para toda posible interferencia intersimbólica. Se asume que la técnica de códigos de líneas han sido usadas para eliminar la parte de baja frecuencia del espectro de datos. Esto sucede en un ambiente LAN/MAN, donde usualmente se adopta un código de línea para proveer una transmisión de datos adecuados para la estimación del receptor.

Con esta suposición y las condiciones de operación simuladas en este trabajo, la memoria del canal ha sido determinada para usarse con menos de tres bits.

Considerando la interferencia intersimbólica generada de los tres bits previos y el desarrollo de tres bits siguientes, se sobreponen todos los posibles diagramas de una secuencia de 3 bits y se examina la apertura del segundo bit.

La forma de onda para un diagrama de ojo típico para una codificación de no retorno a cero (NRZ) es mostrada en la **figura 2.58**.

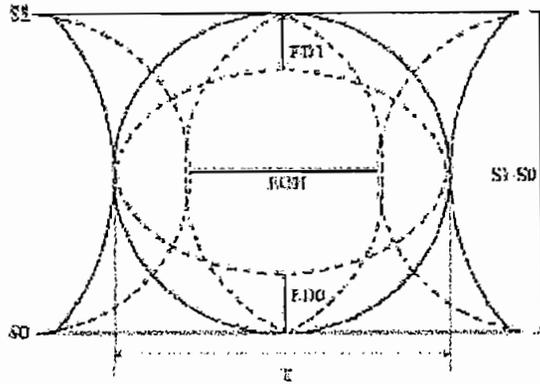


Figura 2.58 Diagrama del ojo mostrando definiciones de aperturas

Existe degradación vertical y horizontal del ojo. La degradación vertical de ojo es definida como :

$$ED_v = \frac{ED_1 + ED_0}{S_1 - S_0}$$

donde S1 y S0 son el estado de señal estable para niveles lógicos uno y cero respectivamente, ED1 y ED0 son la desviación de nivel de señal respectiva comparado con el nivel de estado estable. La apertura horizontal completa del ojo es igual al bit de intervalo T. La degradación horizontal de ojo puede ser así expresada como:

$$ED_H = \frac{T - EO_H}{T}$$

donde EO_H es la apertura horizontal de ojo.

La penalidad de potencia de la forma de onda NRZ puede ser derivada de la degradación vertical de ojo:

$$P_{penalidad}(dB) = 10 \log_{10} ED_v$$

La penalidad de potencia es una medida de la potencia adicional en decibeles requerida para llevar a cabo una apertura de ojo ideal. La degradación horizontal

de ojo aumenta el jitter²⁸, el cual afecta la recuperación de la señal de reloj, incrementando la variación de los instantes de muestreo en el receptor. Estos efectos pueden ser traducidos como una penalidad al sistema. Sin embargo, el cálculo exacto de la penalidad del sistema debido al jitter depende en detalle del circuito recuperador de reloj usado en el receptor.

2.5.3.4.2 Probabilidad de error

El cálculo de la probabilidad de error (P_e) es una de las técnicas más utilizadas para determinar el desempeño de una transmisión digital. Entrega la probabilidad de ocurrencia de errores en la transmisión de datos, a través de un canal conformado por fibra óptica.

Aunque existen diversas técnicas para determinar la probabilidad de error en un sistema de comunicación por fibra óptica, se puede mencionar el método de aproximación gaussiana.

Aproximación gaussiana

Existen varios métodos para determinar la tasa de ocurrencia de errores en la recepción de datos digital. Una técnica común es dividir el número de errores que ocurren en un cierto intervalo de tiempo t , por el número de pulsos ("1"s y "0"s) transmitidos durante este intervalo. Esta técnica se denomina BER (Bit Error Rate), la cual se expresa así:

$$BER = \frac{\#bits..errados}{\#bits..transmitidos} = \frac{N_e}{V_t * t}$$

donde N_e : número de bits errados

V_t : Velocidad de transmisión de pulsos e igual a $V_t = \frac{1}{T_b}$

²⁸ El Jitter es un fenómeno de fluctuación de fase que se da entre el reloj recuperado (en el lado del receptor a partir de la señal recibida) y entre el reloj de referencia del transmisor que utilizó para transmitir los datos

T_b : período o duración de 1 bit

t: tiempo de transmisión de bits

En la figura 2.59 se muestra el gráfico de distribución de probabilidad para niveles de señal de unos y ceros.

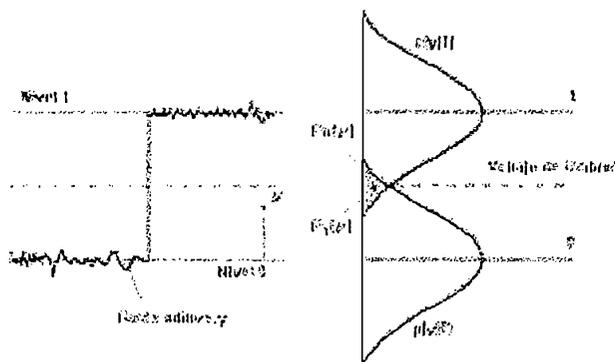


Figura 2.59 Distribución de probabilidad para niveles de señal 1 y 0.

Los BERs típicos para un sistema de telecomunicaciones por fibra óptica varían en el rango de 10^{-6} a 10^{-10} . La tasa de error depende de la relación señal-ruido (S/N) en el receptor (razón entre la potencia de la señal y la potencia de ruido).

La tasa de error requerida y la potencia de ruido máxima permitida en el sistema, definen un límite inferior en el nivel de la potencia de la señal óptica que llega al fotodetector, conocida como *sensibilidad*.

Para calcular la razón de bits errados en el receptor se debe conocer la distribución de probabilidad de la señal a la salida del ecualizador, lo que permitirá tomar la decisión sobre si fue enviado un "1" o un "0". La forma de dos distribuciones de probabilidad se muestran en la figura 2.58.

Asumiendo que los datos enviados son equiprobables (igual probabilidad de ocurrencia de "1s" o "0s") la probabilidad de error P_e es:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{V}{2\sqrt{2}\sigma} \right]$$

donde: *erfc* es la función de error complementaria , cuya expresión matemática es:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

V: amplitud de los datos

σ^2 :varianza de ruido

2.5.3.5 Componentes de un Sistema WDM

Los nuevos y modernos sistemas de comunicaciones ópticas dependen en gran medida de la disponibilidad de sus componentes, así como de subsistemas y bloques funcionales que cumplan estrictas especificaciones.

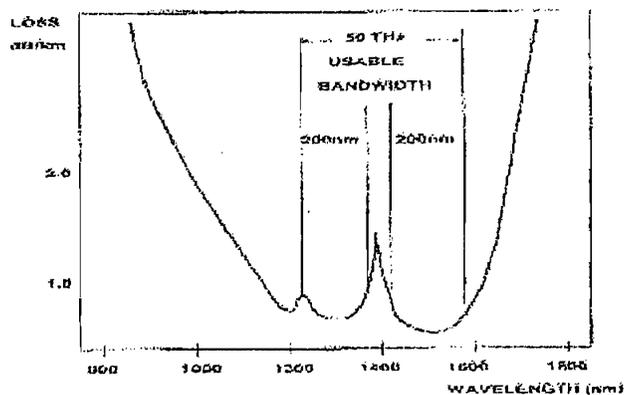
En la actualidad, se diseñan y construyen componentes para sistemas que emplean multiplexación por división de longitud de onda (WDM), como son: fuentes ópticas con múltiples longitudes de onda, láseres sintonizables, amplificadores ópticos de banda ancha, compensadores de dispersión, filtros, demultiplexores ópticos, etc.

A continuación se detallan los componentes que se usan en redes ópticas, que se basan en la multiplexación por división de longitud de onda.

2.5.3.5.1 Fuentes Ópticas

En las redes ópticas WDM, las señales eléctricas son convertidas en señales ópticas (luz) mediante diodos láser cuya longitud de onda se encuentra dentro de

un rango permitido para poder realizar la multiplexación. Existen dos tipos de WDM que han sido desarrollados que se diferencian por las distintas longitudes de onda que utilizan. El WDM convencional está estandarizado internacionalmente por la ITU-T G692 para utilizar longitudes de onda que van desde 1310 nm hasta 1550 nm donde la distancia entre los distintos canales que ocupan la misma fibra está entre 0.8 nm (400 GHz) y 1.6 nm (200 GHz). Este rango de longitudes de onda se escoge debido a que dentro de este rango las pérdidas en la fibra óptica son mínimas, exceptuando el pico de pérdidas existente en 1400 nm debido a las cualidades físicas del material.



Por otro lado existe el WDM Denso o DWDM que utiliza para el mismo rango de longitudes de onda un espaciado entre canales de menos de 100GHz. Ya se han probado sistemas con separación entre canales de 6 nm (50 GHz) y 12 nm (25 GHz) con resultados eficientes.

Así, en función del espaciado entre canales utilizado por WDM, se pueden encontrar sistemas de 4, 8, 16, 32 e incluso 80 canales ópticos, lo que permite alcanzar capacidades de 10, 20, 40, 80 y 200 Gbps que es equivalente a tener una capacidad nominal de 2.5 Gbps por canal. Por ejemplo, con un sistema de 16 canales de 2.5 Gbps de capacidad nominal, es posible transmitir 500.000 conversaciones telefónicas simultáneas en una sola fibra.

En la figura 2.60 se muestra una clasificación de las diferentes posibilidades que existen de láser WDM. La aparición de láser de fibra con múltiples longitudes de

onda realiza la clásica competencia entre los semiconductores y los dispositivos basados en fibra.

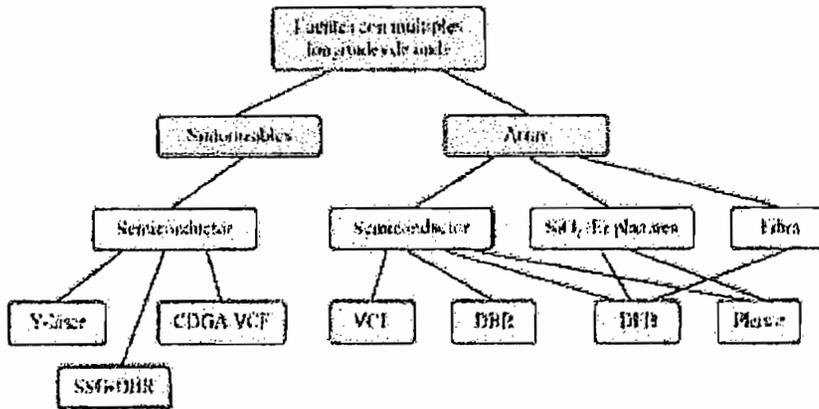


Figura 2.60 Tipos de láser WDM

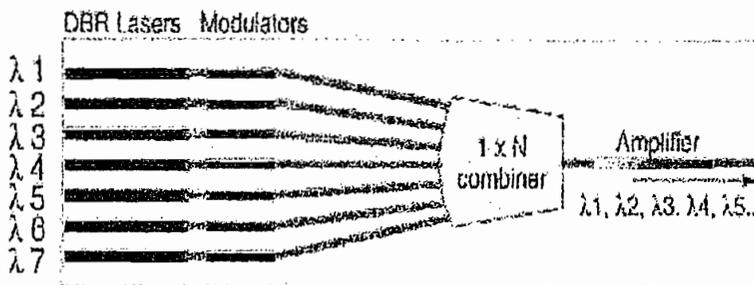
Los láser utilizados en WDM son prácticamente iguales que los utilizados para comunicaciones de larga distancia, excepto por la necesidad de que algunos requerimientos sean más críticos o nuevos, como::

Ancho Espectral: El ancho espectral necesario en WDM depende del número de canales usados en cada uno de los sistemas a implementar y de la tolerancia de sus componentes, como por ejemplo los demultiplexores. Generalmente, cuanto más estrecho es el ancho espectral, mejor es el láser, pero esto implica mayores costes y menor beneficio.

Estabilidad de Longitud de Onda: Generalmente en comunicaciones ópticas, para minimizar los efectos de la dispersión y el ruido, es necesario una estabilidad muy alta. Sin embargo, los sistemas WDM necesitan minimizar constantemente las variaciones de la longitud de onda.

Láseres Sintonizables en Longitud de Onda: La capacidad de sintonización es importante en las redes ópticas. El hecho de que la sintonización en el transmisor o el receptor sea rápida es fundamental para el rendimiento del sistema en topologías LAN y WAN.

Láseres Multi-Longitud de Onda: Este tipo de láseres pueden ser utilizados para implementar una sintonización muy rápida simplemente seleccionando que longitud de onda será transmitida; aun así, pueden transmitirse simultáneamente varias longitudes de onda.. Están hechos mediante una combinación de láseres de diferentes longitudes de onda, juntos en un mismo sustrato, como se ve en la siguiente figura.



2.5.3.5.2 Amplificadores / Repetidores Ópticos

La tecnología WDM permite transmisión de información en un rango amplio de distancias entre emisor y receptor. En distancias cortas la atenuación de la fibra (mínima para una longitud de onda de 1550 nm) y la dispersión (mínima para 1300 nm) no representan un gran problema. Sin embargo para largas distancias estos fenómenos son un factor a tener en cuenta por lo que se requiere el uso de amplificadores / repetidores ópticos. Por ejemplo, en los cables trasatlánticos se colocan repetidores cada 75 km.

Los repetidores convencionales funcionan transformando la señal óptica en eléctrica, amplificando ésta última, y transformándola de nuevo a una señal óptica mediante un diodo láser para de nuevo inyectarla en la Fibra Óptica con mayor potencia que antes. Este proceso es complejo e introduce retardos debido a los dispositivos electrónicos que son necesarios para ello. Este problema se podría solucionar si todo el camino fuese óptico (*all-optical*).

Esta solución se da mediante repetidores / amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (EDFAs). Estos repetidores evitan la conversión de la señal óptica a eléctrica y viceversa, y evitando así los retardos.

El funcionamiento de estos repetidores ópticos se basa en la posibilidad de amplificar una señal óptica de longitud de onda 1550 nm haciéndola pasar por una fibra de 3 metros de longitud, dopada con iones de erbio, e inyectando en ella una luz láser de 650 nm (fenómeno que se conoce como bombeo o pumping), consiguiéndose de esta manera hasta 125 dB de ganancia.

En la actualidad existen repetidores / amplificadores ópticos comerciales que utilizan un láser con una longitud de onda de 980 o 1480 nm en lugar de los 650 nm originales.

Los amplificadores dopados de erbio tienen un rango de funcionamiento limitado en cuando a la longitud de onda de las señales que procesan, como se puede observar en la **figura 2.61**.

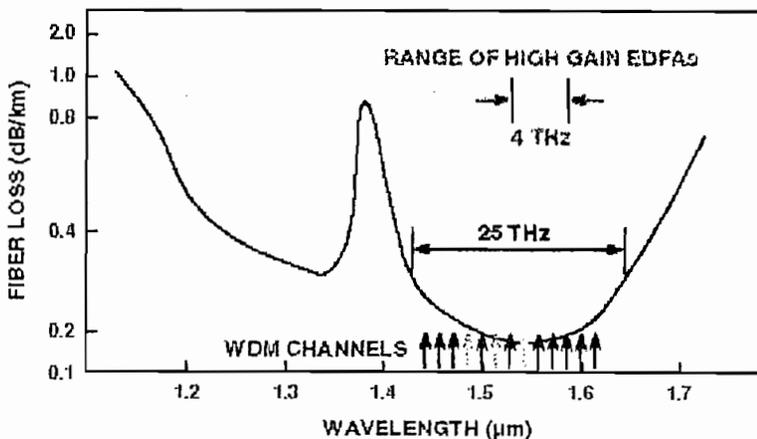


Figura 2.61 Rango de operación de EDFAs

El número de amplificadores en un tramo se reduce en la misma proporción que aumenta el número de canales por una sola fibra, lo que aumenta la fiabilidad del sistema y su complejidad. Debido a la alta potencia de los amplificadores DWDM

y su bajo nivel de ruido, se pueden transmitir hasta 32 canales independientes de 2.5 Gbps cada uno, a lo largo de distancias de hasta 600 Km sin necesidad de utilizar repetidores.

Tipos de Amplificadores

Existen tres tipos básicos de EDFAs:

Amplificadores de Potencia: Son colocados justo después de la etapa de multiplexado, a la salida del sistema transmisor. La limitación de estos amplificadores es por lo general la potencia total de salida.

Amplificadores de Línea: Reciben un nivel relativo de señal bajo y deben amplificarlo por el mayor número de dB posible. Las limitaciones de estos amplificadores son la ganancia, el ruido que introducen y la potencia total de salida.

PreAmplificadores: Estos amplificadores han de ser bastante sensibles, deben tener un bajo nivel de ruido y una ganancia aceptablemente alta debido a que generalmente no necesitan una señal de alta potencia a la salida. Una salida de -20 dBm por canal es normalmente una potencia de salida suficiente.

2.5.3.5.3 Filtros Ópticos

Los filtros ópticos constituyen un importante bloque de una red WDM pues realizan el proceso de selección de un determinado canal en los bloques receptores cuando se trabaja con modulación en intensidad y detección directa, además de esto, auxilia el ruido de emisión espontánea (ASE) generado por los amplificadores ópticos.

Para la recepción de las señales ópticas es necesario el uso de filtros ópticos que permitan seleccionar (demultiplexar) la longitud de onda que nos interesa. Son el equivalente a un filtro paso banda de un sintonizador de radio. Por otro lado debe

existir en la recepción fotodetectores que conviertan la señal óptica, una vez filtrada, en eléctrica.

Características de los filtros ópticos

Un filtro óptico ajustable puede ser representado por una caja, según se ve en la figura 2.62, el que posee en su entrada diferentes señales, cada cual a su frecuencia óptica, y que tiene en su salida, debido al proceso selectivo, sólo una señal.

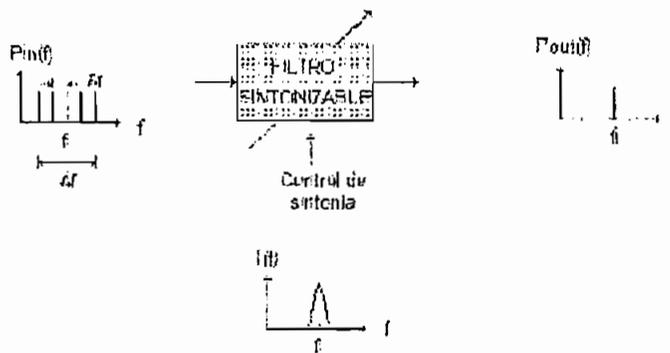


Fig 2.62 Función básica de un filtro sintonizable en la selección de una de entre muchas entradas a diferentes frecuencias.

Los filtros descritos realizan la selección del canal en longitud de onda a través de procesos de interferencia. Así, cuando un canal es ajustado al dispositivo, su señal es reforzada por interferencia constructiva y enviada al bloque receptor, los demás canales a su vez son atenuados a niveles despreciables a través de interferencia destructiva.

Cuando se analiza el desempeño de un filtro óptico se debe tomar en consideración los siguientes requerimientos:

- Número máximo de canales sintonizables
- Tiempo de acceso en la sintonía del canal.

- Pérdidas causadas por inserción y diafonía²⁹
- Atenuación
- Controlabilidad del dispositivo
- Dependencia del dispositivo con la polarización
- Tamaño, consumo de potencia y ambiente de operación del dispositivo
- Costos.

El número de canales sintonizables tal vez sea el más importante requerimiento de un filtro óptico, pues determina cuantos canales de una red FDM/WDM pueden ser seleccionados en los bloques receptores.

Se puede analizar este requerimiento sobre dos aspectos: primero en cuanto al rango al cual el filtro es ajustado y en segundo lugar en cuanto a la selectividad de respuesta en frecuencia cuando el filtro es ajustado.

El rango ideal en el cual el filtro será ajustado para atender las necesidades de las redes FDM/WDM debería ser de 200 nm correspondiente a la tercera ventana (1550 nm) donde se tienen los más bajos valores de atenuación de la fibra monomodo.

A su vez la selectividad de la respuesta en frecuencia determina cual debe ser el espaciamiento mínimo entre los canales, para que una vez seleccionado el canal se tengan las menores penalidades debido al crosstalk.

La velocidad con la cual un filtro óptico puede ser ajustado de una frecuencia a otra, dentro de su rango de ajuste, se determina por su tiempo de acceso en la

²⁹ La diafonía o también conocida como interferencia de Crosstalk es el acoplamiento indeseado entre trayectos de señal.

sintonía del canal y también constituye un importante aspecto en el análisis de aplicabilidad del dispositivo en la red.

Otro importante factor de desempeño del filtro es su pérdida por atenuación pues ésta contribuye con el aumento de la penalidad del enlace.

Un filtro óptico debe ser estable de tal modo que una vez ajustada una frecuencia dada, factores térmicos o mecánicos no causen un desvío en el ajuste mayor que una pequeña fracción de la longitud de onda del canal, además de ser fácilmente reajutable para cualquier valor de frecuencia, por esto la controlabilidad del filtro es un factor importante.

Para evitar el uso de complejos sistemas de control de polarización, uno de los requerimientos de los filtros ópticos es que éstos sean insensibles a la polarización de la señal.

Es posible clasificar de un modo general los diversos tipos de filtros, en cuanto a sus aspectos constructivos como:

- Filtros interferométricos de Fabry-Perot
- Filtros de difracción
- Filtros acusto-ópticos
- Filtros interferométricos de Mac-Zender
- Filtros electro-ópticos
- Filtros de múltiples capas interferentes

•Filtros activos semiconductores DFB o DBR.

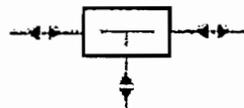
Conviene decir que, a pesar que en muchos casos, estos dispositivos funcionan sólo como filtros, seleccionando una señal con una longitud de onda dada, también pueden actuar como dispositivos multiplexores / demultiplexores.

2.5.3.5.4 Acopladores Ópticos

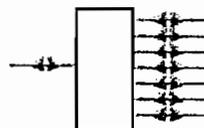
Los acopladores ópticos se emplean para ramificar señales ópticas por dos o más fibras distintas, manteniendo el valor de longitud de onda de entrada, como por ejemplo para desviar señales telefónicas, televisión por cable, etc, por diferentes fibras.

Los acopladores ópticos, son conocidos también como acopladores distribuidores por fusión o Splitters, los cuales se clasifican en:

Distribuidores en serie: son acopladores en "T"



Distribuidores en estrella



Cada salida puede tener un determinado valor de atenuación de la luz, expresada en dB.

También se pueden clasificar en:

Estándar (Standard couplers): para una longitud de onda con desviaciones mínimas, por ejemplo: 1310 +/- 5nm.

De una ventana (Single window couplers): para un rango de longitudes de onda, por ejemplo: 1310 +/- 40nm.

De dos ventanas (Dual window couplers): para dos rangos de longitudes de onda, por ejemplo: 1310 +/- 40 y 1550 +/- 40nm.

Multiplexores de longitud de onda (Wavelength multiplexers): para dos longitudes de onda separadas, por ejemplo: 1310 y 1550 nm.

2.5.3.5.5 Multiplexores

En WDM son necesarios dispositivos eficaces para introducir por una única fibra distintas longitudes de onda. Los multiplexores-demultiplexores para fibra óptica monomodo constan de una o dos ramas de entrada y salida. Fabricados en tecnología de fusión, están diseñados para introducir muy bajas pérdidas de inserción y alto aislamiento. Los extremos de conexión pueden suministrarse terminados con conectores a requerimiento del cliente, que pueden ser FC, SC, ST.

Cada multiplexor se suministra caracterizado con sus medidas de Pérdida de Inserción (PI) y aislamiento de cada una de sus ramas.

Los multiplexores-demultiplexores están disponibles en distintas versiones, variando en ellos la longitud de onda de las distintas puertas o el grado de aislamiento. Las versiones estándar son:

Versión HI: que presenta un altísimo aislamiento. Se suministra en cualquier conectorización. Se encuentra disponible para todas las combinaciones de longitudes de onda: 1310/1550/1650 nm.

Versión NS: Se suministra en cualquier conectorización. Se encuentra disponible para todas las combinaciones de longitudes de onda: 1310/1550/1650 nm.

Versión PM: diseñado para dividir o combinar distintas longitudes de onda en amplificadores ópticos. Se suministra en cualquier conectorización. Se encuentra disponible para 980/1550nm y 1480/1550 nm.

ESPECIFICACIONES.

Configuración estándar de los Multiplexores	1x2 (2x2)		
Longitudes de onda de operación (nm):	1.310 nm & 1.550 nm		
Pérdida de Inserción (dB):	I<0.3 dB	II<0.7 dB	III<1 dB
Aislamiento (dB):	I>15 dB	II>30 dB	III>40 dB
Sensibilidad a la Polarización máx. (%)	±1%		
Directividad (dB):	≥55 dB		
Temperatura de operación:	-20° a +80°C		
Estabilidad de la Pérdida de Inserción con la Temperatura entre -20° y +80°C (dB):	≤0.005 dB/°C		
Tipo de fibra:	cable monofibra (según requerimiento)		
Longitud de la fibra:	según requerimiento		
Tipo de conector:	FC, SC, ST		
Aplicaciones:	Telecomunicaciones		

2.5.3.5.6 *Convertidores de Longitud de Onda*

Los convertidores de longitud de onda son otro componente indispensable en las redes WDM. Su función consiste en modificar la longitud de onda de la portadora sobre la que se encuentran modulados los datos para realizar labores de

conmutación. Las diferentes tecnologías de convertidores se muestran en la figura 2.63.

En cualquiera de ellas, se necesita una fuente láser de bombeo para inducir efectos no lineales. Los convertidores más típicos se basan en el proceso no lineal de mezclado de cuatro ondas (Four-Wave Mixing, FWM) en configuraciones de fibra de dispersión desplazada (Dispersion-Shifted Fiber, DSF) y de amplificador óptico de semiconductor (Semiconductor Optical Amplifier, SOA).

Por otro lado, los convertidores basados en el proceso no lineal de modulación de fase cruzada (Cross-Phase Modulation, XPM) presentan ventajas como son: la reducción del nivel ruido, la reconfiguración del espectro o su alta velocidad.

Además presenta ciertos inconvenientes, que son: su dificultad de integración, la necesidad de estabilización del punto de trabajo o su transparencia solamente a las señales moduladas en intensidad.

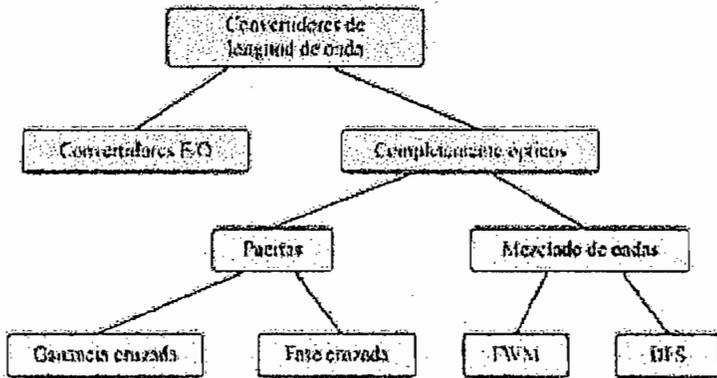


Figura 2.63 Diferentes opciones tecnológicas para la construcción de convertidores de longitud de onda.

2.5.3.5.7 Conmutadores Ópticos

Las redes ópticas WDM también necesitan conmutadores ópticos, los cuales se construyen mediante la integración de elementos conmutadores activos, de dispositivos combinadores y divisores pasivos. Las diferentes opciones para los

conmutadores activos incluyen: activación mecánica, control termo-óptico, electro-ópticos, o incluso completamente ópticos, los que se muestran en la figura 2.64.

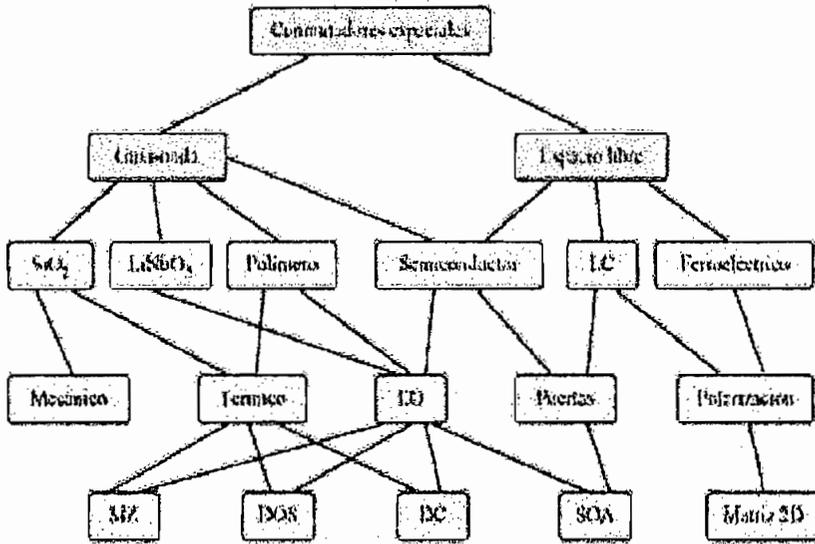


Figura 2.64 Clasificación de los conmutadores ópticos

Un importante factor de diseño de los conmutadores es la relación "on/off", siendo necesarios valores del orden de 30-40 dB para suprimir la diafonía. En este sentido, los mejores conmutadores son los electromecánicos o aquellos basados en puertas de amplificador óptico de semiconductor. Los primeros se utilizan ampliamente debido a su relación "on/off" extremadamente alta, sus bajas pérdidas o su facilidad de uso, aunque tienen como inconvenientes su baja integración y su reducida velocidad de conmutación. Por otro lado, los conmutadores basados en puertas de amplificador óptico de semiconductor, además de su relación "on/off" de 50 dB, ganancia neta y rapidez de conmutación, se utilizan en configuraciones llamadas "clamped gain" que proporcionan mayor linealidad.

2.6 CONECTORES Y EMPALMES

Desde el año 1970 en que se fabricaron las primeras fibras ópticas con una atenuación de 20 dB/km, los sistemas de comunicaciones ópticas se han convertido en una realidad gracias a las continuas mejoras tecnológicas que han permitido alcanzar atenuaciones menores a 0,2 dB/km. Ahora bien, para aprovechar las bajas pérdidas de transmisión de las fibras ópticas resulta crucial el diseño óptimo de las tecnologías de conexionado de las mismas en lo que se refiere a empalmes y conectores.

Los requisitos fundamentales que deben cumplir los distintos métodos de conexionado de fibras se pueden resumir en:

- ❖ reducida degradación de las propiedades de transmisión de la fibra (bajas pérdidas de conexión y/o reflexiones)
- ❖ alta fiabilidad de la conexión
- ❖ manejo sencillo incluso para su realización en campo por parte de operarios e instaladores
- ❖ bajo costo

2.6.1 EMPALMES

Debido a que una bobina de cable de fibra óptica no llega a superar los 2Km de longitud, mientras que la distancia entre dos repetidoras o centrales puede ser de 30 o 40 Km, deben realizarse empalmes entre tramos de fibra, entre cada final y los conectores.

Dos técnicas de empalmes de fibras ópticas que se manejan actualmente son:

- a) Empalme mecánico

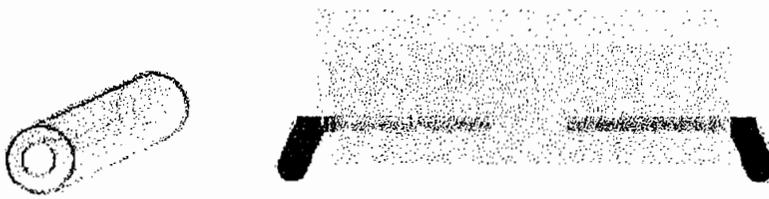
b) *Empalmes de fusión por arco eléctrico.*

Empalmes manuales o mecánicos

Son empalmes rápidos, permanentes o temporarios, que pueden usarse, por ejemplo, para probar bobinas. Producen atenuaciones altas, del orden de 0.20 a 1dB.

Vienen rellenos con gel para mejorar la continuidad de la luz.

Pueden ser cilindros con un orificio central, o bandejitas cerradas con dos pequeñas llaves que nos permiten introducir las fibras.



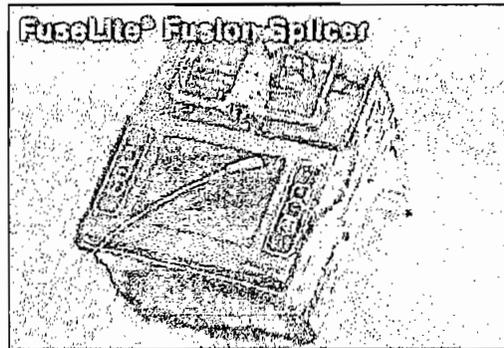
A las fibras se les retira unos 3 cm del coating (recubrimiento de plástico), se limpian con alcohol isopropílico y luego se les practica un corte perfectamente recto a unos 5 o 6 mm, con un cortador (cutter o cleaver) especial, con filo de diamante, para luego ser introducidas en los cilindros o bandejas.

Empalmes por fusión

Son empalmes permanentes y se realizan con máquinas empalmadoras, manuales o automáticas, que luego de cargarles las fibras sin coating y cortadas a 90° realizan un alineamiento de los núcleos de una y otra, para fusionarlas con un arco eléctrico producido entre dos electrodos.

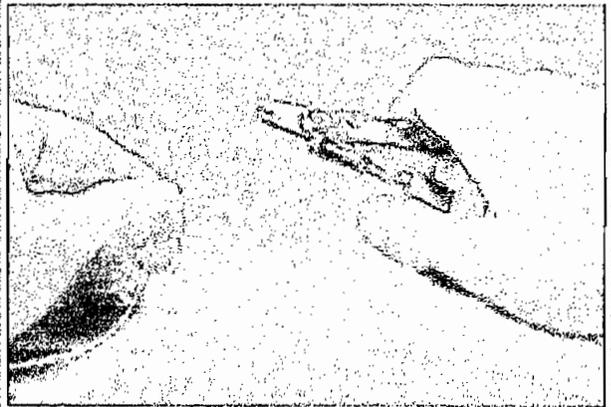
Llegan a producir atenuaciones casi imperceptibles (0.01 a 0.10 dB).

Como ejemplo se describe a continuación los pasos para realizar un empalme de fibras mediante fusión, utilizando una empalmadora comercial (FUJIKURA FSM 40S).

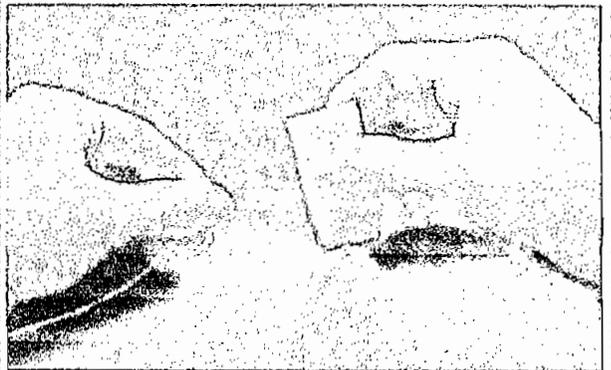


FUJIKURA FSM 40S

Con una pinza especial (125 μ) se pela (strip) unos 5cm de coating (recubrimiento)

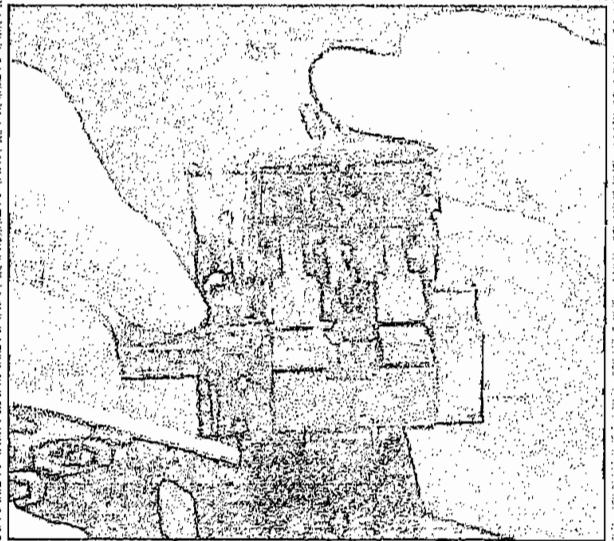


Se limpia (clean) la fibra con un papel suave remojado en alcohol isopropílico



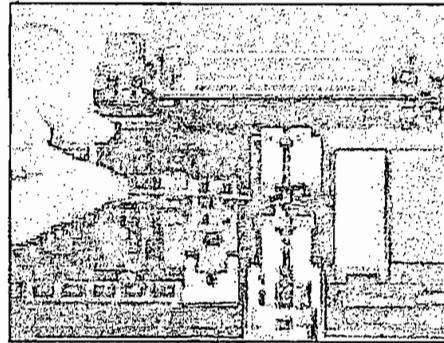
Se corta (cleave) la fibra a unos 8 a 16mm con un cutter o cleaver, con hoja de diamante, apoyando la fibra dentro del canal, haciendo coincidir el fin del recubrimiento con la división correspondiente a la medida.

Una vez cortada, la fibra no se vuelve a limpiar ni tocar.

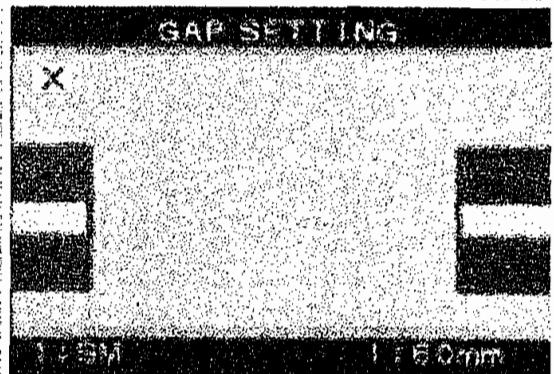


Cuidando que la fibra no contacte con nada, se introduce en la zapata de la empalmadora, sobre las marcas indicadas.

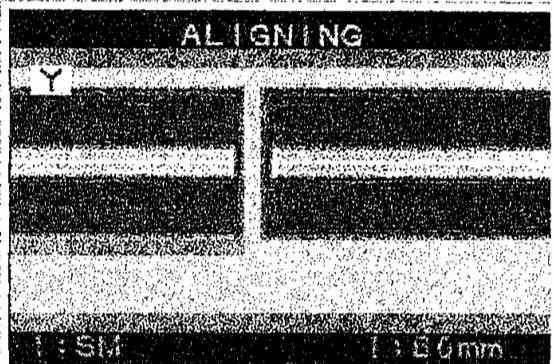
Repetir el procedimiento con la otra fibra.



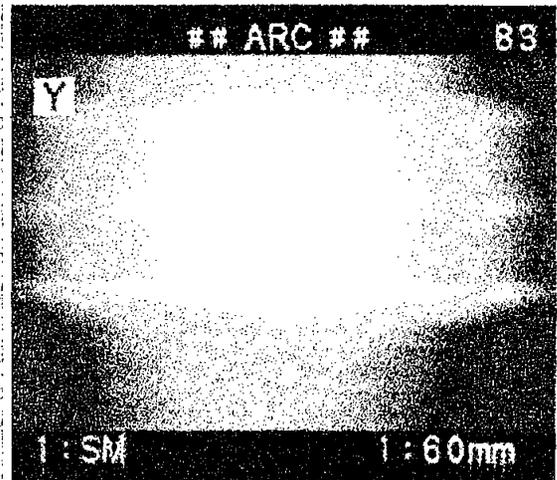
En la pantalla de la empalmadora se verán las dos puntas, pudiéndose observar si el ángulo es perfectamente recto, sino fuera así la máquina no nos permitiría empalmar.



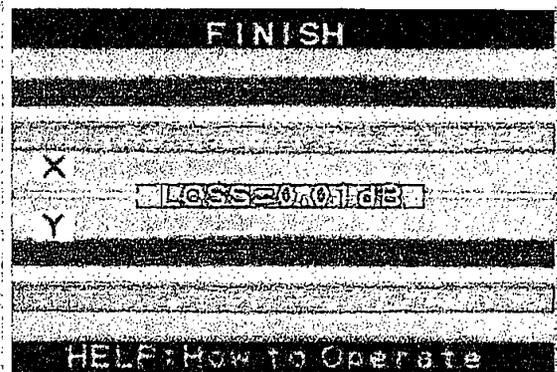
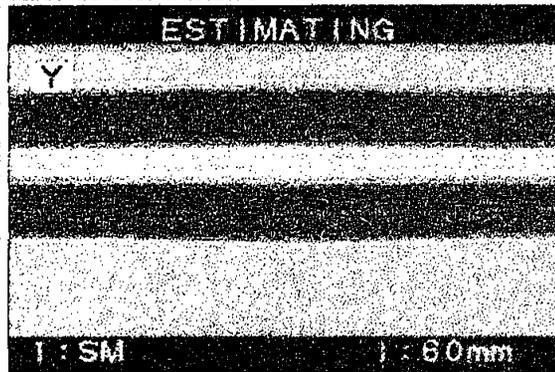
Presionando el botón de empalme, estando la empalmadora ajustada en automático, la misma procederá a alinear en los ejes x e y, y a acercar las puntas a la distancia adecuada.



Una vez cumplido esto, a través de un arco eléctrico dado entre dos electrodos, aplicará una corriente de prefusión durante el tiempo de prefusión, y luego una corriente de fusión durante el tiempo de fusión.



Luego hará una estimación (muy aproximada) del valor de atenuación resultante.



2.6.2 CONECTORES

Los conectores se utilizan al igual que los empalmes para la unión de fibras ópticas mediante elementos de conexión.

Los conectores al igual que los empalmes deben cumplir los siguientes requerimientos para un buen rendimiento del enlace óptico.

- pérdida de inserción baja (< 1.5 dB) y insensible a cambios de temperatura
- protección contra humedad y polvo
- resistencia a fuertes tensiones

En la conexión de fibras usando conectores, las fibras están pegadas con epóxica en enchufes llamados virolas (*ferrule*), los que poseen un orificio central de gran

exactitud (μm), como se indica en la figura 2.65. La virola hace parte del macho, y son de cerámica (80%) o de acero inoxidable

La hembra contiene un manguito de alineación, el que con elementos de precisión coloca las virolas de los machos y así las fibras frente a frente.

Un resorte en el macho hace que las virolas se empujen con una cierta fuerza, lo que asegura que no haya separación entre las dos fibras. La fibra cuando sale generalmente está recubierta.

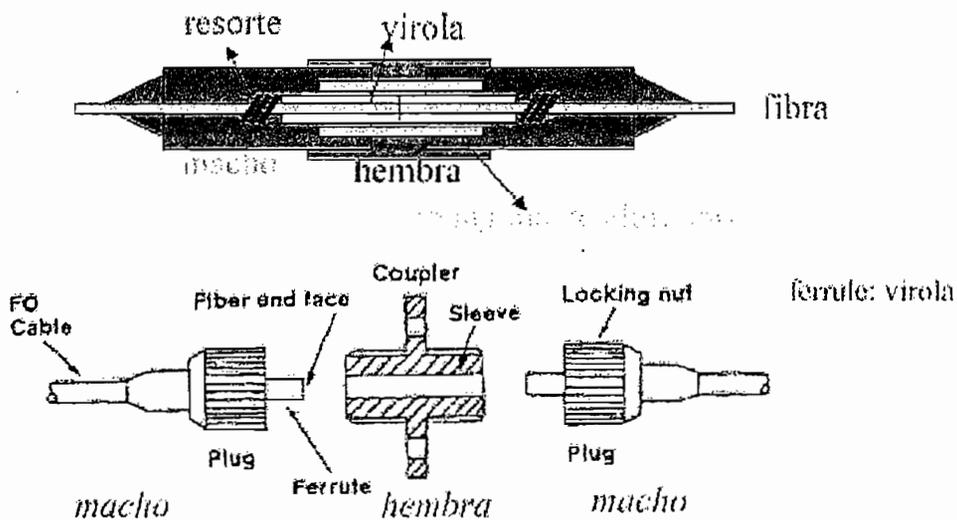


Figura 2.65 Construcción de un conector

Existen varios tipos de conectores que cumplen de manera diferente con los requerimientos indicados anteriormente, no existe un conector común estándar, la única estandarización es el diámetro de la virola (2.5 mm), eso permite el unir dos conectores del mismo tipo pero de diferentes fabricantes.

2.6.2.1 Tipos de Conectores

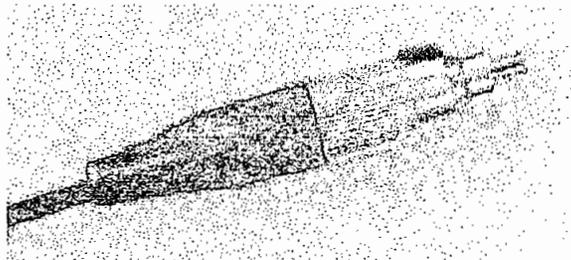
Los conectores más difundidos son: ST, SC y FC.

Hay que citar además los conectores E2000 y los conectores Optoclip.

Conector FC (macho)

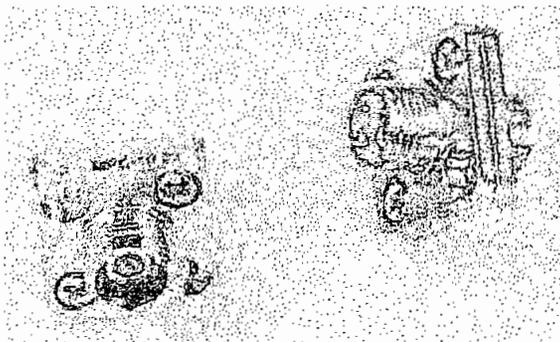
Es utilizado más en laboratorios y equipo especializado.

Es colocado en el adaptador FC (hembra) atornillando fuertemente, así el comportamiento óptico es dependiente de la instalación.



Adaptador FC (hembra)

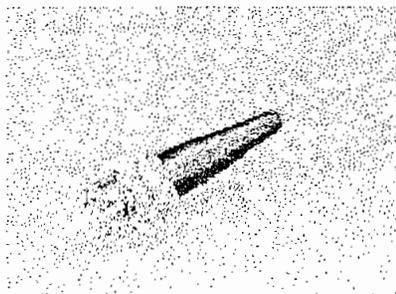
Al insertar el conector FC macho, el eje de su virola debe estar en línea con el eje de la manguita de la hembra, caso contrario se puede dañar la virola.



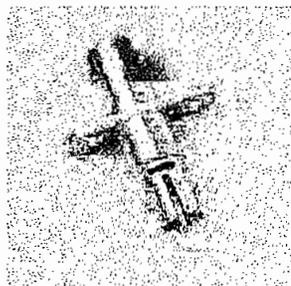
Conector ST

Se instala empujando y girando 90°, para lo cual los ejes de la virola y manguita deben estar alineados, el comportamiento óptico no depende de la instalación.

Utilizado mucho en redes LAN



macho

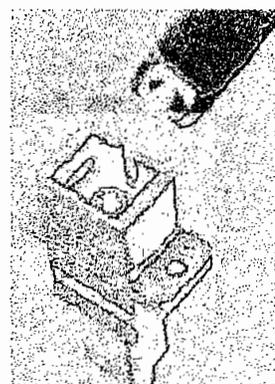
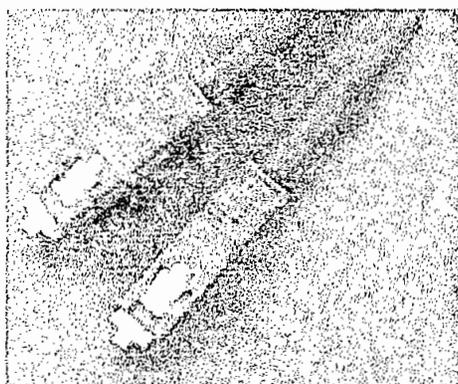


hembra

Conector SC

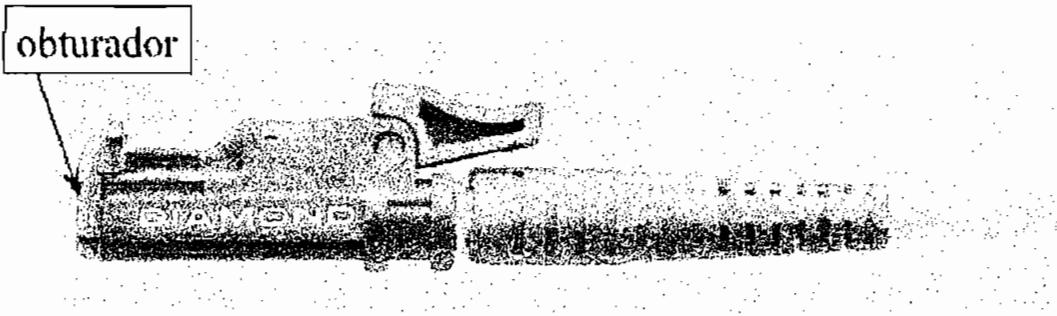
Al momento de instalarlo indica el "fin de instalación" (hace "clic"), posee un comportamiento óptico muy estable, se puede conectar y reconectar muchas veces.

Es posible una alta densidad de conectores en un panel de conexión (patch panel) porque no se necesita espacio para girar el conector como en el caso del FC.



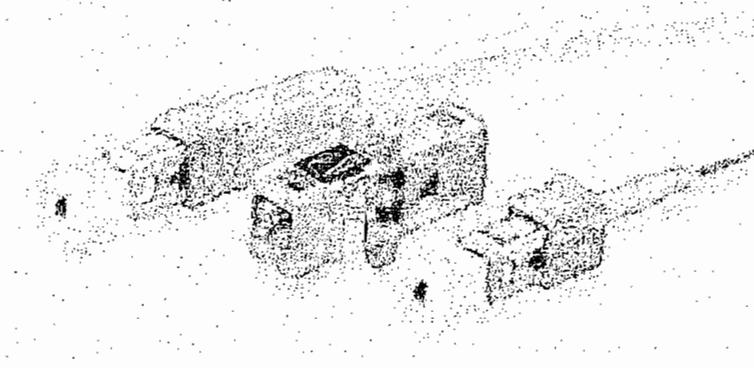
Conector E2000

Es un conector " push- pull " (empuje - tire)". Posee obturador para impedir que la luz láser pueda llegar al ojo. Actualmente es bastante usado



Conector Optoclip

Fabricado por DEUTSCH. No contiene virola, entonces para su instalación se hace concordar las fibras por un adaptador especial, para lo cual sus extremos están cortados sobre un ángulo (6°), es posible instalarlo en el campo de trabajo.



En cuanto al comportamiento óptico, no existe una diferencia entre una virola cerámica y metálica, aunque se puede reconectar muchas más veces el conector de virola cerámica.

2.7 EQUIPOS TERMINALES DE LINEA EN UN SISTEMA ÓPTICO

En los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, como en cualquier otro sistema digital, existen los equipos terminales de línea (transmisor y receptor) así como los equipos intermedios (regeneradores intermedios). Los equipos terminales poseen etapas que se encargan del tratamiento de la señal para una transmisión de calidad, los regeneradores intermedios, tienen como misión

restituir la señal a su nivel y características originales. Al conjunto se le llama equipo de línea (EL).

Su función es transmitir una estructura de canales de señales analógicas o digitales, multiplexadas en frecuencia o en tiempo, de modo que se respeten unos criterios mínimos de calidad.

Además, es necesario añadir en estos equipos principales señales de supervisión, control y alimentación.

Por último, conviene recordar que los sistemas de multiplexación en longitud de onda permiten aumentar la capacidad del cable o establecer comunicaciones bidireccionales sobre una misma fibra, con las ventajas consiguientes para transmisiones de señales de diferentes características.

2.7.1 EQUIPO TRANSMISOR

Es aquel que recibe la señal (tipo RZ: retorno a cero) procedente del MUX digital, el cual realiza el proceso del multiplexado, para luego pasar al proceso de codificación de línea, esta señal codificada llega al transmisor óptico (LED o LASER) el cual transforma dicha señal en impulsos luminosos los mismos que viajarán a través de la fibra óptica. En la figura 2.66 se muestra un diagrama en bloques de los componentes de un equipo transmisor.

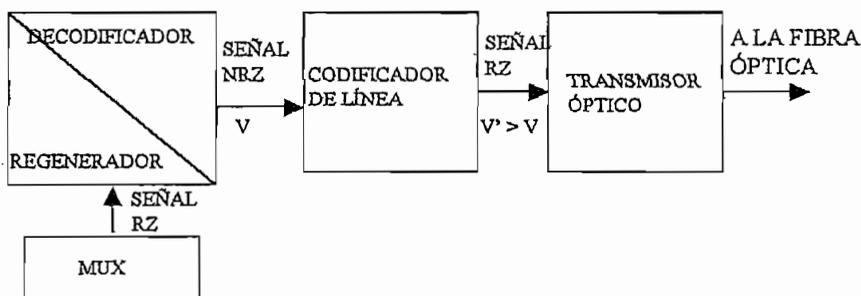


Figura 2.66 Equipo Transmisor

2.7.1.1 Regenerador / Decodificador

La señal procedente del multiplexor (MUX) se la regenera para eliminar el *Jitter* (fluctuación de fase de los impulsos). Una vez regenerada la señal pasa al decodificador, que debe tratar la señal procedente del MUX.

La señal que llega al decodificador puede ser del tipo HDB₃ (código bipolar de alta densidad) con tres niveles 1, 0, y -1, código de línea usado para sistemas a 34 Mb/s) o bien con codificación CMI (Código de marca invertida) con dos niveles (bipolar) +V y -V, propia de sistemas a 140 Mb/s. En la figura 2.67 se muestra un ejemplo de la codificación de línea CMI.

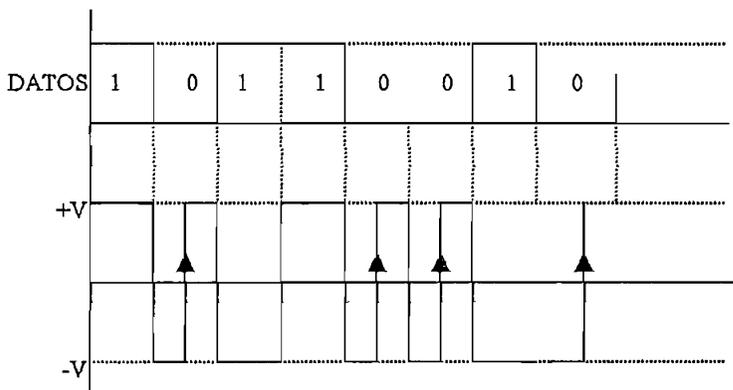


Figura 2.67 Codificación CMI

El código CMI permite que el equipo discrimine entre "0" y "1" repetidos. Cada "0" lógico se codifica con una transición positiva (hacia arriba) a la mitad del período de bit, mientras que el "1" lógico se codifica con pulsos positivos y negativos alternados. Por tanto si cierto número de 0s o 1s binarios aparecieran consecutivamente, la señal CMI estaría formada por ráfagas de impulsos, que dan la información de temporización necesaria.

El trabajo del decodificador es convertir la señal bipolar en una señal binaria unipolar del tipo no retomo a cero (NRZ), con lo que se facilita la recuperación del sincronismo si aparece una secuencia muy larga de caracteres iguales.

2.7.1.2 Codificador de Línea

Su función es adaptar la señal al medio de transmisión, mediante la conversión convirtiendo la señal binaria unipolar del tipo NRZ que viene del decodificador a un código de línea apropiado, que pueden ser: 5B6B (significa que a 5 dígitos binarios de entrada se le asignan 6 dígitos binarios de salida), para sistemas de 34 Mb/s y los 7B8B para los de 140 Mb/s, los cuales son los más utilizados.

Un codificador de línea del tipo mBnB es una máquina secuencial que transforma una palabra de m bits en otra de n bits, de modo que $n > m$. Así, si la velocidad de entrada al codificador es v , la de salida será:

$$v' = \frac{n}{m} * v$$

donde: v' : velocidad de salida del codificador

v : velocidad de entrada del codificador.

m : bits de entrada

n : bits de salida

La señal binaria sufre una conversión serie-paralelo, formando bloques de m bits, que después se codifican en bloques de n bits. El sincronismo se obtiene dividiendo por m la frecuencia de la señal que llega, y los bloques de n bits en paralelo se convierten en un tren de impulsos serie que se leen a una frecuencia igual a n/m de la correspondiente a la señal de entrada. La señal así codificada se entrega al transmisor óptico para su tratamiento.

La codificación mBnB presenta ventajas frente a otros tipos, así:

- Se recupera el sincronismo de los receptores mediante el circuito de reloj del codificador.
- Se conforma adecuadamente la señal de acceso a la fibra
- Se monitorizan los errores en línea mediante los bits de redundancia
- Se posibilita un funcionamiento más uniforme de la fuente luminosa.

2.7.1.3 Transmisor Óptico

Primeramente la señal que llega del codificador (tipo NRZ) de línea pasa de NRZ a RZ mediante una puerta AND, con lo que el consumo de energía es menor y se alarga la vida del equipo.

La señal codificada proveniente de la compuerta AND (tipo RZ) es transformada en impulsos luminosos por el transmisor óptico (LED o LASER) al modular la corriente de polarización del transmisor óptico utilizado.

La corriente de polarización del diodo se obtiene a partir de un circuito excitador que, en el caso de un diodo LED, es muy simple: los impulsos de corriente de excitación variarán entre cero y un valor máximo cuando se trate de una modulación de dos niveles. Un amplificador de microondas puede suministrar impulsos con tiempos de subida de 2 a 3 ns, ya que la impedancia de entrada es una resistencia de pocos ohmios y la capacidad es de 200 o 300 pF. Un montaje del circuito de polarización de un diodo LED puede ser el mostrado en la figura 2.68, en el que se emplea una red de compensación R-C.

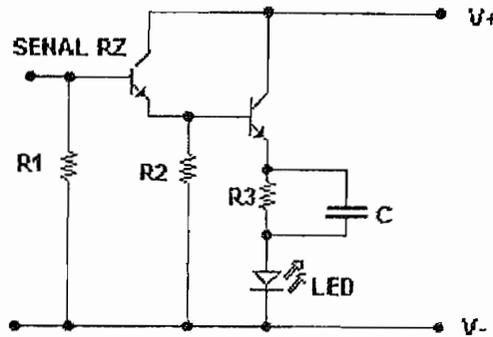


Figura 2.68 Circuito de Polarización del LED

Cuando se trata de un diodo láser, el circuito excitador puede ser, en principio, el mismo, pero debiendo trabajar siempre por encima de la corriente umbral, hay que establecer una excitación en c.c. igual o superior a este umbral, superponiéndose a ella los impulsos de modulación.

Por otra parte, hay que tener en cuenta la dependencia de las características de salida del láser con la temperatura, así como su variación con el envejecimiento, lo que obliga a insertar en el circuito transmisor los elementos adecuados de control.

2.7.2 EQUIPO RECEPTOR

El equipo receptor tiene la función de convertir la señal óptica en eléctrica, sea este proceso en un repetidor intermedio o en el equipo terminal de recepción. El receptor óptico debe cumplir con las siguientes características:

- ❖ Alto rendimiento
- ❖ Respuesta rápida
- ❖ Bajo nivel de ruido

- ❖ Alta sensibilidad
- ❖ Suficiente ancho de banda
- ❖ Ligero, barato y de vida útil alta

2.7.2.1 Receptor Óptico

Está compuesto por un fotodetector que puede ser: fotodiodo simple de unión PN, diodo PIN, APD, fototransistor, etc, seguido por un preamplificador de bajo nivel de ruido y un circuito de control automático de ganancia (CAG) el cual mantiene constante la señal de entrada al regenerador. Estos bloques se muestran en la figura 2.69.

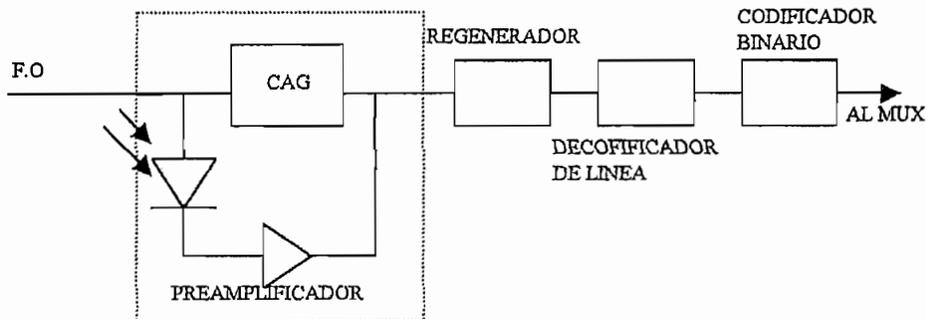


Figura 2.69 Diagrama de bloques de un receptor óptico en un repetidor intermedio

Igual que en un transmisor óptico la temperatura afecta en el funcionamiento del detector utilizado que generalmente es APD, por ende se debe prever un control en la fuente de alimentación de estos fotodiodos, que puede ser por ejemplo mediante un sensor térmico.

En el dimensionamiento de un enlace mediante fibra óptica (que se tratará en el siguiente capítulo) los parámetros para el diseño del receptor óptico son : BER, la sensibilidad y la relación señal a ruido (S/N).

CAPITULO III

MÓDULO DE DISEÑO Y SIMULACIÓN. CRITERIOS DE DISEÑO DE UN ENLACE POR FIBRA ÓPTICA. CIRCUITOS PRÁCTICOS PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS.

3.1 INTRODUCCIÓN

Para el diseño de un enlace de comunicaciones, utilizando como medio de transmisión fibra óptica se debe tener en cuenta las siguientes características:

1.- Se debe dar una solución técnica – económica aceptable

2.- Parámetros Importantes:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| a) Tipo de señal a ser transmitida: | -Analógica o digital
-Ancho de banda de la señal
-Velocidad de Transmisión |
| b) Descripción del Emisor Óptico: | -Potencia óptica
-Ancho espectral
-Longitud de onda de trabajo
-Eficiencia de acoplamiento emisor-fibra |
| c) Parámetros de la Fibra Óptica: | -Atenuación de la fibra |

- Tipo de Fibra (Multimodo o Monomodo)
- Dispersión de la fibra
- Factor de mérito (MHz*Km)
- Apertura numérica
- Longitud del canal óptico

d) Descripción del Receptor Óptico- Ancho de banda de recepción

- Potencia óptica requerida o sensibilidad para un determinado SNR y BER
- Tipo de detector a utilizar

Para diseñar un enlace óptico, se empieza por la determinación de los requerimientos del sistema, tales como: velocidad de transmisión, ancho de banda, distancia del enlace, BER, etc.

Dependiendo de estos requerimientos, se escogen los dispositivos idóneos con las características necesarias, como son: fuente óptica, fibra óptica, detector óptico, conectores, empalmes, etc.

Los datos de estos elementos, a considerar son:

- **Fuente Óptica:** Potencia óptica incidente hacia la fibra, ancho espectral, tiempos de respuesta, pérdidas de acoplamiento fuente – fibra.
- **Fibra Óptica:** Tipo (multimodo o monomodo), atenuación, dispersión, apertura numérica, longitud de onda de operación.
- **Detector Óptico:** Sensibilidad, BER, ancho de banda de recepción
- Pérdidas por conectores y empalmes.

Todas las características mencionadas anteriormente deben tomarse en cuenta así como ser relacionadas entre sí, debido al efecto que tienen en un enlace de fibra óptica, por ejemplo la atenuación y dispersión de la fibra dependen obviamente del tipo de fibra óptica utilizada, pero además de la longitud de onda de operación del sistema.

Para cumplir con los requerimientos del sistema, utilizando los elementos ópticos seleccionados, se plantea el criterio de: *Balance de Pérdidas y Potencias* que se tienen en el enlace. Además se debe averiguar si existe la necesidad de utilizar regeneradores, mediante el *cálculo de la distancia entre regeneradores*.

3.1.1 BALANCE DE PÉRDIDAS Y POTENCIAS

Este balance tiene como objetivo determinar la potencia óptica requerida en el transmisor de tal manera que se cumplan los requerimientos planteados anteriormente y principalmente verificar que llegue suficiente potencia al receptor con el BER o S/N deseados.

El balance de pérdidas y potencias se define como:

$$\text{Potencia del transmisor} - \text{Potencia óptica de recepción} = \sum \text{Pérdidas} + \text{Margen}$$

El factor $\sum \text{Pérdidas}$, es la suma de todas las pérdidas existentes en un enlace óptico, como son: debidas a la fibra óptica, conectores, empalmes, etc.

El *Margen* es una potencia de seguridad que cubre, las degradaciones que sufre un sistema óptico, como son las debidas al transmisor, empalmes o roturas en la fibra.

3.2 CALCULO DE LA DISTANCIA ENTRE REGENERADORES

En un enlace óptico de largo alcance, existe la necesidad de regenerar la señal debido al efecto que produce la atenuación y dispersión, haciendo perder las características iniciales con que fue transmitida la señal.

Un enlace óptico usando regeneradores se muestra en la figura 3.1

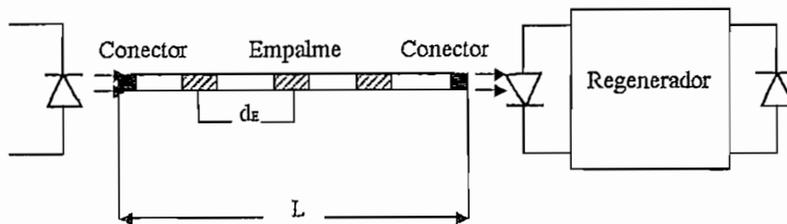


Figura 3.1 Esquema de un enlace con regenerador

La distancia máxima entre regeneradores puede encontrarse mediante dos criterios:

- ❖ Atenuación máxima permisible
- ❖ Limitaciones por ancho de banda

3.2.1 CRITERIO DE LA ATENUACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE

Para encontrar la distancia a la cual se encontrarán los regeneradores nos valemos de el balance de pérdidas y potencias, de la siguiente manera:

$$P_E - P_D = L_{EF} + N * \alpha_E + L_{FD} + \alpha_F * L + M_s$$

donde: P_E : Potencia óptica del emisor (dBm)

P_D : Potencia requerida en el detector (dBm)

L_{EF} : Pérdida de acoplamiento emisor – fibra o atenuación por conector, depende del tipo de conector utilizado, generalmente oscila entre 0 y 2 dB.

$N * \alpha_E$: Pérdida de acoplamiento fibra – fibra o pérdidas por empalme, en la cual se tiene que:

N. número de empalmes que se tiene por cada sección de regeneración, se trata de tener el mismo número de empalmes en todas las secciones.

α_E : Atenuación por empalme, generalmente no será mayor que 1 dB.

L_{FD} : Pérdida de acoplamiento fibra – detector o atenuación por conector, dependiendo del tipo de conector utilizado.

$\alpha_F * L$: Pérdida de la fibra, donde:

α_F : coeficiente de atenuación de la fibra, depende del tipo de fibra óptica utilizada en el enlace.

L: longitud de la sección de regeneración

M_S : Margen de degradación o seguridad del sistema, aquí se incluirá la degradación del equipo, de la fibra, conectores y empalmes. Generalmente se tiene valores entre 3 y 8 dB.

Entonces la longitud máxima que se puede tener en una sección de regeneración es:

$$L_{\max} \leq \frac{P_E - P_D - L_{EF} - N * \alpha_E - L_{FD} - M_s}{\alpha_F}$$

Para unas condiciones extremas del enlace se tendrá que el margen de seguridad es de 8 dB, entonces:

$$L_{\max} = \frac{P_E - P_D - L_{EF} - N * \alpha_E - L_{FD} - 8}{\alpha_F}$$

Se tiene también una relación entre el número de empalmes (N) y la longitud máxima de la sección de regeneración, de la siguiente manera:

$$N = \frac{L_{\max}}{d_E} - 1$$

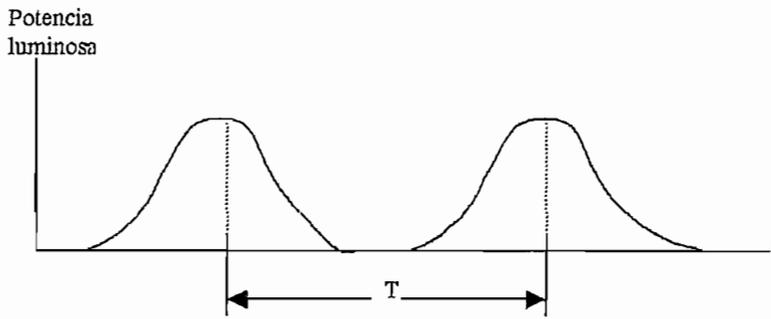
donde d_E es la distancia entre empalmes, tratando de realizar los empalmes a intervalos iguales en todas las secciones de regeneración, si reemplazamos esta relación en la ecuación general de la longitud máxima, tendremos:

$$L_{\max} = \frac{P_E - P_D - L_{EF} - L_{FD} + \alpha_E - 8}{\alpha_F + \frac{\alpha_E}{d_E}}$$

donde P_E , P_D , L_{EF} y L_{FD} están expresados en dB, α_E en dB por emplame, α_F en dB/Km y d_E en Km.

3.2.2 CRITERIO DE LA MÁXIMA DISPERSIÓN POR LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA

La dispersión limita el ancho de banda de transmisión, debido a que los pulsos luminosos pueden interferirse, si el período de transmisión (T) es demasiado pequeño.



Entonces el ensanchamiento máximo de los pulsos o dispersión máxima (S_{\max}) debe relacionarse con el período mínimo de los pulsos T_{\min} , de tal manera de evitar la interferencia entre símbolos (ISI), evitando así una degradación del BER.

El ancho de banda de transmisión (B) está limitada por la dispersión presente en la fibra óptica, de la siguiente manera:

$$B = \frac{1}{T_{\min}}$$

En general se estima que para evitar el ISI, se debe cumplir que:

$$S(ns) \leq \frac{0.5}{V_x(Mbps)}$$

El valor 0.5 implica que el ensanchamiento dispersivo máximo del pulso debe ser equivalente al 50% del período de la señal transmitida, para que así evitar la interferencia.

Sabiendo que la dispersión total es la contribución de la dispersión modal y la dispersión cromática que a su vez es la formada por la dispersión del material y la dispersión de guíasondas, se tiene:

$$\sqrt{S_{MD}^2 + (S_m^2 + S_g^2)} \leq \frac{0.5}{V_{\alpha}}$$

donde:

S_{MD} : dispersión modal , presente solo en *Fibras Multimodo*

S_m : dispersión del material, despreciable para $\lambda = 1300$ nm

S_g : dispersión de guíaondas, despreciable para fibras multimodo.

3.2.2.1 Máxima Dispersión en Fibras Multimodo

En fibras multimodo la dispersión de guíaondas es despreciable y la dispersión modal es superior a la dispersión del material, por tanto la dispersión modal es el principal factor de limitación por ancho de banda en fibras multimodo.

La dispersión modal se da por la diferencia de tiempos de retardo de grupo de los distintos modos de propagación, esta dispersión es proporcionada por el fabricante de la fibra óptica, y se tiene que:

$S_{MD} = 0.1$ a 0.3 ns/Km para fibras multimodo de índice gradual

$S_{MD} = 10$ a 50 ns/Km para fibras multimodo de índice escalonado

Experimentalmente se ha encontrado que la dispersión modal en fibras multimodo se incrementa a razón de L^γ , donde L es la longitud entre transmisor y receptor o entre regeneradores, γ es una constante denominada como *factor de concatenación de ancho de banda de dispersión modal*, que tiene que ver con el grado de mezcla entre los diferente modos transmitidos por la fibra, en general:

$\gamma = 0.5$ para fibras multimodo de índice escalonado

$\gamma = 0.6 - 0.8$ para fibras multimodo de índice gradual

3.2.2.1.1 *Máxima dispersión en Fibras multimodo de índice escalonado*

En estas fibras la dispersión modal es la predominante y es la única que se toma en cuenta para el análisis de la longitud máxima, de la siguiente manera:

$$S(L) = S_{MD} * L^\gamma$$

entonces:

$$S_{MD} * L^\gamma \leq \frac{0.5}{V_{tx}}$$

$$L \leq \left(\frac{0.5}{V_{tx} * S_{MD}} \right)^{1/\gamma} \text{ en (Km)}$$

donde:

V_{tx} : Velocidad de transmisión en Mbps

S_{MD} : dispersión modal en ns/Km

3.2.2.1.2 *Máxima dispersión en Fibras multimodo de índice gradual*

Para estas fibras es conveniente tomar en cuenta además de la dispersión modal, la dispersión del material, siendo esta igual a:

$$S_m = M * \Delta\lambda * L \quad (\text{ps})$$

siendo:

M : coeficiente de dispersión del material (ps/ns*Km)

$\Delta\lambda$: ancho espectral del emisor óptico (nm)

L : longitud de regeneración (Km)

Por tanto se tiene lo siguiente:

$$\sqrt{(S_{MD} * L)^2 + (M * \Delta\lambda * L)^2} \leq \frac{0.5}{V_x}$$

Si evaluamos esta ecuación podremos encontrar la longitud máxima entre regeneradores o entre transmisor y receptor.

3.2.2.2 Máxima Dispersión en Fibras Monomodo

Para fibras monomodo no existe la dispersión modal, por tanto la dispersión total está afectada solo por la dispersión cromática, que está formada por la contribución de la dispersión material del (despreciable para $\lambda = 1300$ nm) y la de guiaoondas.

Por tanto, la longitud máxima del enlace o entre regeneradores para fibras monomodo, en función de la dispersión cromática, será:

$$k * \Delta\lambda * L \leq \frac{0.5}{V_x}$$

.por tanto:

$$L \leq \frac{0.5}{k * \Delta\lambda * V_x}$$

k : es el coeficiente de dispersión cromática, por ejemplo la UIT-T en su recomendación G.652, menciona que:

$$k \leq 6 \frac{ps}{nm * Km} \quad \text{para } \lambda = 1300 \text{ nm}$$

3.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN UN ENLACE ÓPTICO

Para el diseño de un sistema de transmisión mediante fibra óptica primeramente se debe verificar la factibilidad del enlace óptico ha implementar, determinando que los factores de atenuación como dispersión no limitan la operación normal del sistema.

Uno de los parámetros importantes para la selección de componentes ópticos a utilizar es la longitud de onda.

Para determinar la longitud de onda del enlace óptico ha implementar se debe considerar factores de atenuación y dispersión, teniendo presente que la longitud de onda limita el tipo de fuente y detector óptico a ser usados.

La primera ventana (800 – 900 nm), generalmente 850 nm, es poco usada en sistemas de transmisión de baja velocidad de transmisión y pequeñas distancias.

La segunda ventana de transmisión (1250 nm – 1350 nm), generalmente 1300nm, presenta la menor atenuación y dispersión, por ende permite mayor alcance en cuestión a distancia del enlace óptico, generalmente la longitud de onda de 1300nm es usada para sistemas de transmisión de altas velocidades de transmisión y grandes distancias.

La multiplexación de longitud de onda (WDM) trabajando en la tercera ventana (1550 nm), es la técnica que está siendo muy utilizada, ya que permite la

transmisión a grandes distancias y altas velocidades, superiores a las alcanzadas en las dos primeras ventanas.

3.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES ÓPTICOS

Los componentes ópticos que intervienen en un sistema de transmisión óptico elemental son: el emisor óptico, la fibra óptica y el receptor óptico, los cuales son seleccionados principalmente en función de la longitud de onda del sistema y la aplicación, para el cual son destinados.

3.3.1.1 Selección del Emisor Óptico

Las principales consideraciones para elegir la fuente óptica a utilizar son: su ancho espectral, la potencia de salida y su tiempo de conmutación.

Prácticamente la elección del tipo de emisor óptico, se da entre el emisor láser (LD) y el diodo LED.

El diodo láser genera una gran potencia óptica de salida, angosto ancho espectral y una rápida conmutación de los bits de entrada, por estas características es utilizado principalmente en sistemas de alta velocidad y largo alcance.

En cambio el diodo LED genera una baja potencia óptica de salida, gran ancho espectral y lenta respuesta de conmutación, principalmente estas fuentes ópticas son usadas en sistemas de baja velocidad de transmisión y pequeñas distancias.

Estas características se resumen en la **tabla 3.1**, de los dos tipos de fuentes ópticas.

Parámetro	LED		LD	
	Longitud de onda nm	800 – 900	1300/1550	800 - 885
Ancho espectral nm	45	100	3 a 5	3 a 5
Tiempo de conmutación ns	5 a 20	5 a 20	<1	<1
Potencia luminosa	30 a 100 μ W	50 a 100 μ W	1 a-5 mW	1 a 3 mW
Longitud de transmisión en Km a una velocidad en Mbps	1 a 5 Km 30 a 100 Mbps	1 a 5 Km 50 a 200 Mbps	5 a 20 Km <565 Mbps	Hasta 35 Km <2.5 Gbps

Tabla 3.1 Características de Fuentes Ópticas

3.3.1.2 Selección de la Fibra Óptica

Los factores de atenuación por unidad de longitud y dispersión son las características principales para la elección del tipo de fibra óptica ha usar en el enlace óptico.

De los tipos de fibras ópticas mencionadas en el capítulo anterior, se tiene que las fibras monomodo con índice escalonado (SM,SI) presentan menores pérdidas por unidad de longitud que las fibras multimodo de índice escalonado (MM,SI) y de índice gradual (MM,GI).

En cuestión a dispersión se tiene la siguiente relación:

$$SM < MM,GI < MM,SI$$

Teniendo en cuenta que la dispersión total es la contribución de la dispersión cromática (S_C) y de la dispersión modal (S_{MD}) y que a 1300 nm de longitud de onda la dispersión del material es nula. La fibra óptica monomodo presenta

menores valores de dispersión total que las otras fibras, debido a que en este tipo de fibra está presente sólo la dispersión cromática y no la dispersión modal.

Por las características antes mencionadas se puede generalizar que para sistemas de largo alcance (distancias mayores a 20 Km), gran capacidad de transmisión (> 100 Mbps) y bajas pérdidas de atenuación se utiliza fibras monomodo (SM), mientras que para sistemas de corto alcance (distancias menores a 20 Km) y pequeñas capacidades de transmisión (<100 Mbps) se usa fibras multimodo de índice escalonado o de índice gradual, generalmente es utilizada la fibra multimodo de índice gradual (MM, GI), estas referencias se pueden observar en la tabla 3.2

Parámetro	MM, GI		SM,SI
	50/125 (diámetro del núcleo/manto)	100/140	
Atenuación (dB/Km)			
850 nm	2.8	5	0.7
1300 nm	0.9	2.5	0.5
1550nm	0.5	1.2	0.25
Factor de Mérito (MHz*Km)			
850 nm	1000	100	>100000
1300 nm	6000	100	>100000
1550nm	10000	150	>10000

Tabla 3.2 Características de Fibras Ópticas

3.3.1.3 Selección del Detector Óptico

Generalmente los detectores ópticos más difundidos en el mercado son: APD y PIN. Los fotodetectores de avalancha o APD presentan una rápida velocidad de respuesta o pequeño tiempo de conmutación y alta sensibilidad, por estas características los APDs son usados en sistemas de transmisión de gran

capacidad y largas distancias, mientras que los fotodiodos PIN son usados en sistemas de pequeña capacidad y cortas distancias, debido a su lenta velocidad de respuesta y baja sensibilidad.

En base a todas las consideraciones de selección de los componentes ópticos que intervienen en un enlace óptico, se puede generalizar que:

- ❖ Para enlaces de pequeña y mediana capacidad (< 100 Mbps) y cortas distancias de transmisión (< 20 Km) se trabaja en la segunda ventana de transmisión (1300 nm), sin descartar la posibilidad de la primera ventana (850 nm) que no es muy usada, además se recomienda utilizar los siguientes componentes ópticos:

Fuente óptica: Diodo LED

Fibra Óptica: MM, GI para telefonía urbana (34 Mbps), transmisión de datos

MM, SI para transmisión de datos, redes LAN, etc.

Detector óptico: Fotodiodo PIN

- ❖ Para enlaces de altas velocidades de transmisión (> 100 Mbps) y grandes alcances (> 20 Km), se recomienda trabajar en la segunda o tercera ventana (1300 o 1550 nm), y usar los siguientes componentes ópticos:

Fuente Óptica: LD

Fibra Óptica: SM,SI para enlaces intercontinentales

Detector Óptico: Fotodetector de avalancha (APD)

Las anteriores generalizaciones se presentan también en función de las recomendaciones estandarizadas por la ITU-T para componentes ópticos, que intervienen en un enlace de fibra óptica.

3.4 DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELEMENTAL A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA.

Para una mejor comprensión de las Comunicaciones Ópticas se propone en el presente trabajo el diseño de un enlace a través de fibra óptica con los siguientes parámetros para su desarrollo:

- Velocidad de transmisión : 10 Mbps
- Tipo de señal : digital
- Distancia del enlace : 1 Km
- BER : 10^{-9}

En los parámetros importantes para el diseño de un enlace óptico se debe incluir el BER (tasa de bits errados), ya que en función de este valor se escogerá el tipo de receptor óptico apropiado con un factor de sensibilidad que asegure dicho BER y por consiguiente un valor de señal a ruido (S/ N) específico.

En la guía didáctica computacional se halla el diseño del enlace del tipo digital a través de fibra óptica para la comunicación entre dos puntos separados una distancia de 1000 m mediante la transmisión de bits a una velocidad de 10 Mbps y una tasa de bits errados de 10^{-9} (1 bit errado en 10^9 bits transmitidos). En la selección de los componentes se debe aplicar los criterios antes mencionados.

3.4.1 CRITERIOS DE DISEÑO DEL ENLACE ÓPTICO

Analizando los parámetros o exigencias del sistema a implementar se concluye que se trata de un enlace de pequeña capacidad (en general $V_{tx} < 100$ Mbps) y corta distancia (en general $d < 20$ Km) y de acuerdo a los criterios de selección de los componentes, analizados anteriormente se puede decir que los componentes ópticos más idóneos a utilizar son:

Fuente óptica : Diodo emisor de luz (LED)

Fibra óptica : MM, GI o MM,SI

Detector óptico : Fotodiodo PIN

Ventana de transmisión : Segunda ventana (1300 nm). Se puede utilizar también la primera ventana (850 nm).

Para las especificaciones requeridas del enlace se recomienda el uso de fibra multimodo de índice escalonado o multimodo de índice gradual, como por ejemplo la fibra óptica normalizada: Multimodo 62,5/125: EIA³⁰ – 492, ISO³¹ 793 la cual presenta las características mencionadas en la **tabla 3.3**.

³⁰ EIA: Electronics Industries Association es una de las Organizaciones de estandarización Nacional.

³¹ ISO: International Standard Organization, es una de las Organizaciones de estandarización Internacional que rige en el Ecuador a parte de la UIT-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

Parámetro	MULTIMODO 62,5/125: EIA-492, ISO 793
Apertura numérica	NA = 0,275 (+/- 0,015)
Perfil de índice de refracción	Índice en Escalón
Índice de refracción del núcleo	1,5
Índice de refracción del manto	1,47
Diámetro del núcleo	62,5 μm (+/- 3 μm)
Diámetro del manto (Cladding)	125 μm (+/- 1 μm)
Recubrimiento de sílica (Coating)	245 μm (+/- 10 μm)
Longitud de onda de aplicación	850 y 1300 nm
Atenuación a 850 nm	Entre 3 y 3,2 dB/km
Atenuación a 1300 nm	Entre 0,7 y 0,8 dB/km
Ancho de banda a 850 nm	Entre 200 y 300 MHz
Ancho de banda a 1300 nm	Entre 400 y 600 MHz
Dispersión Total ns/Km	3
Alcance (m)	< 2000 m

Tabla 3.3 Características de la Fibra Multimodo 62,5/125

Se puede utilizar también fibra óptica multimodo 100/140 que también cumple con los requerimientos del enlace, con pequeñas variaciones en los valores de los parámetros respecto a la fibra multimodo 62,5/125 recomendada anteriormente.

En el mercado se disponen de una gran variedad de detectores ópticos que operan normalmente con las especificaciones del enlace a diseñar, específicamente el fabricante de componentes para fibra óptica MOTOROLA SEMICONDUCTOR recomienda el uso del Fotodetector MFOD2404, el cual consta de un fotodiodo PIN integrado a un preamplificador, este detector puede operar a una velocidad de transmisión de 10 Mbps para recepción de señales digitales, dicho elemento presenta las características mencionadas en la **tabla 3.4.**

Parámetro	Símbolo	Valor Típico	Unidad
Responsividad ($V_{cc} = 5V, P = 2\mu W$) $\lambda = 850$ nm	R	35	mV/ μW
Velocidad de bits	V_b	10	Mbps
Tasa de bits errados	BER	10^{-9}	-
Tiempo de respuesta	t_r, t_f	35	ns
Relación señal a ruido $P_{in} = 1 \mu W$	SNR	35	dB
Mínima potencia de entrada	P_{in}	2	μW

Tabla 3.4 Características ópticas del detector óptico MFOD2404

Las demás especificaciones de fabricación de este detector óptico se muestran en los ANEXOS.

Las características ópticas del detector, mencionadas anteriormente cumplen satisfactoriamente las especificaciones del sistema a implementar.

Igualmente que los detectores, existen en el mercado una variedad de fuentes ópticas que cumplen con las necesidades del sistema, una de tantas fuentes emisoras de luz es MFOE3100 recomendada por MOTOROLA, que presenta especificaciones de fabricación mostradas en la tabla 3.5.

Característica	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia de emisión ($I_f = 50$ mA)	P_L	10 (Mín)	MW
Longitud de Onda de emisión	λ	850	Nm
Tiempos de subida y bajada ($I_f = 50$ mA dc)	t_r t_f	19 14	Ns

Tabla 3.5 Características de la fuente óptica MFOE3100

En los ANEXOS se mencionan otras características de este tipo de fuente.

En las especificaciones de Motorola Semiconductors de elementos optoelectrónicos que fabrican, menciona la compatibilidad de la fuente óptica y el detector con preamplificador escogidos, pero además indica la posibilidad de utilizar la fuente óptica mencionada (MFOE3100) con el fotodetector de diodo PIN MFOD3100, cuyas características se indican en los ANEXOS.

3.4.1.1 Control de Parámetros: Atenuación y Ancho de Banda

El enlace óptico dimensionado funcionará correctamente si se controlan dos parámetros importantes:

1. La Atenuación, cuyo control se realiza a través de un balance de pérdidas y potencias.
2. Ancho de banda o Velocidad de Transmisión, lo que implica estudiar los tiempos de respuesta de los elementos ópticos y la dispersión de la fibra óptica

Las pérdidas, potencias y tiempos de respuesta (tiempos de subida), que están involucrados en un enlace por fibra óptica, se muestran en la figura 3.2.

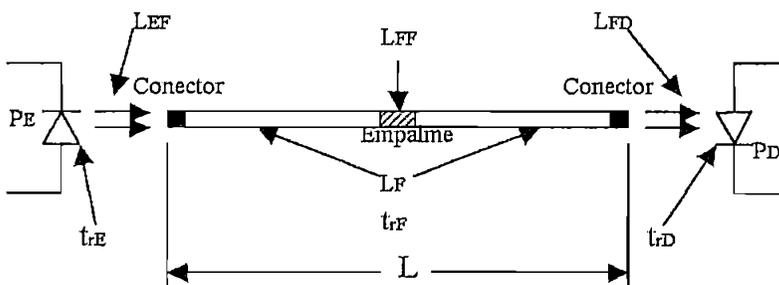


Figura 3.2 Pérdidas, potencias y tiempos de subida en un sistema óptico

3.4.1.1.1 *Control de la Atenuación: Balance de Pérdidas y Potencias*

El balance de potencias y pérdidas tiene como objetivo la determinación de la factibilidad del sistema implementado, en función del control de la atenuación total del enlace para obtener la potencia incidente necesaria en el receptor con los requerimientos de BER y SNR específicos.

Las pérdidas y potencias en un sistema de transmisión mediante fibra óptica se relacionan por la ecuación:

$$P_E - P_D = L_{EF} + L_{FF} + L_{FD} + L_F + L_M \quad (1)$$

- donde:
- P_E : Potencia óptica del emisor (dBm)
 - P_D : Potencia requerida en el detector (dBm)
 - L_{EF} : Pérdida de acoplamiento emisor – fibra (dB)
 - L_{FF} : Pérdida de acoplamiento fibra – fibra (dB)
 - L_{FD} : Pérdida de acoplamiento fibra – detector (dB)
 - L_F : Pérdida de la fibra
 - L_M : Margen de degradación o seguridad (dB)

Potencia Óptica del Emisor (P_E). Las características de fabricación de la fuente óptica MFOE3100, especifican que la potencia óptica acoplada a una fibra de 62,5 μm o 100 μm , mayor a 1 m de longitud, y AN=0.28, es igual a 10 μW (0.01 mW). Esta será entonces la potencia óptica entrega por el emisor, e igual a :

$$P_E = 10 * \log \frac{0.01mW}{1mW} = -20dBm$$

Potencia óptica requerida en el detector (P_D). El detector con Preamplificador incluido especificado para un BER= 10^{-9} y una tasa de bits de 10 Mbps, requiere

de una potencia mínima incidente de $2 \mu W$, para su operación, este valor en dBm es igual a :

$$P_D = 10 * \log \frac{2 * 10^{-3} mW}{1 mW} = -27 dBm$$

Pérdida de acoplamiento emisor – fibra (L_{EF}). El emisor escogido, según Motorola su fabricante, es compatible para ser utilizado con el conector AMP #228756-1 para conectar el emisor con la fibra óptica. La empresa Tyco Electronics es uno de los fabricantes de este tipo de receptáculos, éste conector está diseñado para fibras 62.5/125 μm , con pérdidas de acoplamiento emisor – fibra entre:

$$L_{EF} = 0.4 - 0.7 \text{ dB}$$

Pérdidas de acoplamiento fibra – fibra (L_{FF}). En el enlace diseñado se utilizará una fibra de 1Km de longitud, por lo que no se incluirán empalmes fibra – fibra, por tanto se tendrá que:

$$L_{FF} = 0 \text{ dB}$$

Pérdidas de acoplamiento fibra – detector (L_{FD}). El módulo fotodetector con preamplificador incluido de Motorola, es compatible para ser utilizado con el conector AMP #228756-1, dicho módulo incluye un segmento de fibra óptica de 300 μm con alta apertura numérica ($AN=0.6$) para ser empalmada con la fibra 62.5/125 μm que tiene una $AN = 0.275$, por tanto no existirá pérdida por acoplamiento por diferencia de áreas, ni por diferencia de apertura numérica y las pérdidas por mal alineamiento serán insignificantes. Entonces las pérdidas fibra - detector se producirán por reflexión de señal, la cual se relaciona con los índices de refracción de los núcleos que son aproximadamente iguales a 1.5, por tanto se tiene que:

$$L_{FD} = 20 \log \frac{1}{1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2}$$

donde :

$n_1 = 1.5$ índice de refracción del núcleo

$n_0 = 1$ índice de refracción del aire

reemplazando los valores se tiene que:

$$L_{FD} = 0.35dB$$

Pérdida en la fibra (L_F). La fibra especificada anteriormente tiene un coeficiente de atenuación (α) de 3.1 dB/Km, por tanto en el enlace de 1000 m, la fibra tendrá una atenuación de:

$$L_F = \alpha * L$$

$$L_F = (3.1dB / Km) * (1Km) = 3.1dB$$

Para encontrar el margen de seguridad o de degradación del sistema (L_M), reemplazamos los valores anteriormente calculados en la Ec. (1), teniendo así:

$$-20 + 27 = 0.5 + 0 + 0.35 + 3.1 + L_M$$

obteniendo así:

$$L_M = 3.05dB$$

El margen de seguridad resultante (L_M), indica que la operación del enlace diseñado no se verá afectado por la potencia, es decir que la potencia incidente en la fibra, luego de que se debilite por los efectos de atenuación tanto de conectores como de la misma fibra, será suficiente para la operación normal del fotodetector, obteniendo así valor establecido del BER= 10^{-9} .

3.4.1.1.2 Control del ancho de Banda: Tiempos de Subida y Dispersión

El control del ancho de banda tiene como objetivo determinar si el enlace diseñado es lo suficientemente rápido como para operar con la velocidad de transmisión especificada de 10 Mbps.

Los tiempos de subida del emisor y del detector son los tiempos de respuesta del dispositivo al recibir pulsos de entrada, los tiempos de subida se representan por: t_r .

El tiempo de subida de la fibra es equivalente a la dispersión total que presenta el conductor óptico.

Para que la operación normal del sistema no esté limitada por la dispersión o sea ensanchamientos de los pulsos que producen interferencia, se debe cumplir la siguiente relación:

$$Tr_s.(ns) \leq \frac{500}{V_t(Mbps)}$$

donde Tr_s es el tiempo de subida del sistema

V_t es la velocidad de transmisión del enlace en Mbps

En general el tiempo de subida para un sistema de fibra óptica está dada por la expresión:

$$Tr_s \approx 1.1 * \sqrt{Tr_E^2 + Tr_F^2 + Tr_D^2}$$

donde:

Tr_E : tiempo de subida del emisor

Tr_F : dispersión total de la fibra

Tr_D : tiempo de subida del fotodetector

Las especificaciones del emisor y detector escogidos, nos dan los siguientes valores de tiempos de respuesta o de subida:

Emisor MFOE3100 : $t_r = 19 \text{ ns}$

Detector MFOD2404: $t_r = 35 \text{ ns}$ o el fotodetector MFOD3100: $t_r = 2 \text{ ns}$

Y la dispersión total que presenta la fibra óptica es de: 3 ns/Km , por tanto:

$$T_{rF} = 3 \text{ ns/Km} * 1 \text{ Km}$$

$$T_{rF} = 3 \text{ ns}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$T_{r_s} = 1.1 * \sqrt{19^2 + 3^2 + 35^2} = 43.9 \text{ ns}$$

o usando el fotodetector MFOD3100, se tiene:

$$T_{r_s} = 1.1 * \sqrt{19^2 + 3^2 + 2^2} = 21.27 \text{ ns}$$

y el factor: $\frac{500}{V_t} = \frac{500}{10 \text{ Mbps}} = 50 \text{ ns}$

Como se obtuvo $T_{r_s} < \frac{500}{V_t}$, entonces los elementos utilizados: fuente, fibra y detector óptico son lo suficientemente rápidos para que el sistema trabaje a la velocidad de 10 Mbps y con el $\text{BER} = 10^{-9}$.

Entonces concluimos que el enlace óptico diseñado es totalmente factible para implementar, ya que con los anteriores resultados no se tendrá limitación debido a la atenuación ni a dispersión.

3.4.2 ANÁLISIS GENERAL DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR

3.4.2.1 Circuito Transmisor

La función del circuito transmisor es de recibir una señal eléctrica de entrada y generar una corriente excitadora adecuada para el funcionamiento de la fuente óptica seleccionada.

Los requerimientos necesarios que debe cumplir el circuito transmisor son:

- ❖ El circuito transmisor debe entregar una corriente acorde con la recomendada para la fuente óptica a utilizar, para el caso específico del enlace se utiliza el LED infrarrojo MFOE3100, el cual trabaja con una corriente de polarización directa $I_F = 50$ mA máximo, para un voltaje de polarización directo $V_F = 1.7$ V valor típico.
- ❖ El ancho de banda o rapidez de conmutación del circuito debe ajustarse a las características respectivas de la señal de información.

Un circuito transmisor consta de tres bloques principales como se indica en la figura 3.3.



Figura 3.3 Diagrama de bloques del circuito transmisor

Interfaz Lógica.- este bloque cumple la función de adaptar la señal al canal de transmisión, es decir adaptar una familia lógica compatible con la del equipo generador de la información a transmitir, que puede ser un computador, en este caso se debería usar un convertidor RS-232 a TTL.

Circuito excitador del LED.- este bloque entrega la corriente directa requerida por el LED para que este dispositivo desarrolle la potencia óptica deseada, de esta manera realizar la conmutación de esta corriente en respuesta a los pulsos de entrada con tiempos de subida y bajada consecuentes con la máxima velocidad de transmisión.

LED y conector óptico.- Este dispositivo emite los pulsos de energía óptica, que se transmitirá por la fibra óptica, la cual se encuentra conectada con la fuente óptica mediante un conector óptico.

El circuito transmisor que se puede utilizar en este enlace, se muestra en la **figura 3.4**, el cual permite la transmisión de señales TTL (0_L equivale a 0 V y 1_L equivale a 5 V).

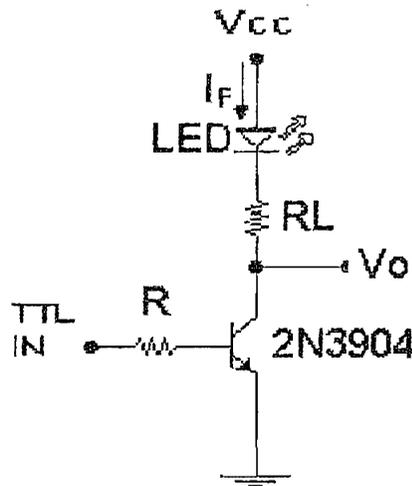


Figura 3.4 Transmisor TTL

Para el diseño del circuito mencionado, se analizan los datos de los elementos utilizados, los cuales se mencionan a continuación:

DATOS

EMISOR LED: LED INFRARROJO MFOE3100 de Motorola Semiconductors

Corriente directa: $I_F = 60 \text{ mA}$ (máx)

Voltaje directo: $V_F = 1.7 \text{ V}$ (Típico)

TRANSISTOR: 2N3904 (ECG 123 AP)

Voltaje de saturación colector – emisor: $V_{CE}(\text{sat})$

$V_{CE}(\text{sat}) 1 = 200 \text{ mV}$ (máx); para $I_B = 1 \text{ mA}$, $I_C = 10 \text{ mA}$

$V_{CE}(\text{sat}) 2 = 300 \text{ mV}$ (máx); para $I_B = 5 \text{ mA}$, $I_C = 50 \text{ mA}$

Voltaje de saturación base – emisor: $V_{BE}(\text{sat})$

$V_{BE}(\text{sat}) 1 = 650 \text{ mV}$ (mín) y 850 mV (máx); para $I_B = 1 \text{ mA}$, $I_C = 10 \text{ mA}$

$V_{BE}(\text{sat}) 2 = 950 \text{ mV}$ (máx); para $I_B = 5 \text{ mA}$, $I_C = 50 \text{ mA}$

Ganancia de corriente: h_{FE}

$h_{FE} 1 = 100$ (mín), 200 (typ), 300 (máx); para $V_{CE} = 1 \text{ V}$, $I_C = 10 \text{ mA}$

$h_{FE} 2 = 60$ (mín); para $V_{CE} = 1 \text{ V}$, $I_C = 50 \text{ mA}$

DESARROLLO:

Cuando se ingresa un 1_L , el transistor entra en un estado de saturación, por tanto la corriente directa (I_F) que circula por el diodo infrarrojo es igual a la corriente que circula por el colector de transistor ($I_{C\text{sat}}$) y además:

$$I_F = I_{C\text{sat}} = \frac{V_{cc} - V_F - V_{CE\text{sat}}}{R_L}$$

donde: $I_F = 10$ o 50 mA (condiciones de prueba), corriente directa del LED

$I_{C\text{sat}}$: corriente colector de saturación

V_{CC} : voltaje de polarización

$V_F = 1.7 \text{ V}$, voltaje directo del LED

$V_{CE\text{sat}} = 0.2 \text{ V}$ para $I_F = 10 \text{ mA}$ y 0.3 V para $I_F = 50 \text{ mA}$

R_L : resistencia de carga

Asumiendo $V_{CC} = 5 \text{ V}$

Calculamos para dos condiciones de corriente directa por el LED infrarrojo:

a) $I_F = 10 \text{ mA}$

$$10 \text{ mA} = \frac{5V - 1.7V - 0.2V}{R_L}$$

por tanto:

$$R_L = 310\Omega$$

escogiendo un valor normalizado, se tiene:

$$R_L = 330\Omega$$

La corriente que circula por la base (I_B) del transistor, cuando éste se satura es aproximadamente igual a:

$$I_B \cong \frac{I_{Csat}}{\beta_{dc}} = \frac{10 \text{ mA}}{100} = 100 \mu\text{A}$$

Además:

$$I_B = \frac{V_i - V_{BEsat}}{R}$$

Para asegurar la saturación, escogemos $I_B = 150 \mu\text{A}$, entonces:

$$150 \mu\text{A} = \frac{5V - 0.75V}{R}$$

Resolviendo la ecuación.

$$R = 28.33 \text{ K}\Omega$$

Escogemos un valor normalizado de resistencia:

$$R = 27 \text{ K}\Omega$$

b) Para $I_F = 50 \text{ mA}$, se tiene:

$$V_{CEsat} = 0.3 \text{ V}$$

$$V_{BEsat} = 0.9 \text{ V}$$

$$h_{FE} = 60$$

Reemplazando estos valores en las ecuaciones, como en el primer caso, se obtienen los siguientes resultados:

$$R_L = 56\Omega$$

y

$$R = 4.7K\Omega$$

3.4.2.2 Circuito Receptor

La etapa de recepción de la onda luminosa emitida por el circuito emisor a través de la fibra óptica, consta básicamente de los siguientes bloques partes (figura 3.5):



Figura 3.5 Diagrama de bloques de la etapa de Recepción

Fotodetector y conector óptico: el conector es el acoplamiento entre la fibra óptica y el elemento detector de las ondas luminosas, el fotodetector se encarga de asimilar la energía luminosa y reproducirla en corriente eléctrica.

Etapa de Amplificación: Debido a que las ondas luminosas son afectadas por distintos parámetros antes vistos, la energía luminosa llega muy débil, motivo por el cual es necesario amplificar dichas señales.

Etapa de decisión: En esta etapa se discrimina los datos que llegan al detector, es decir se identifica los 0L y 1L que salieron inicialmente del emisor.

Interfaz lógica: Adapta la señal entregada por el circuito receptor al terminal o equipo de recepción de los datos, para el caso de tratarse de un computador se tendrá que usar un convertidor TTL a RS-232.

El circuito receptor de señales TTL, recomendado por Motorola Semiconductors, se muestra en la figura 3.6, el cual utiliza el fofodetector MFOD3100, que es compatible con el emisor utilizado.

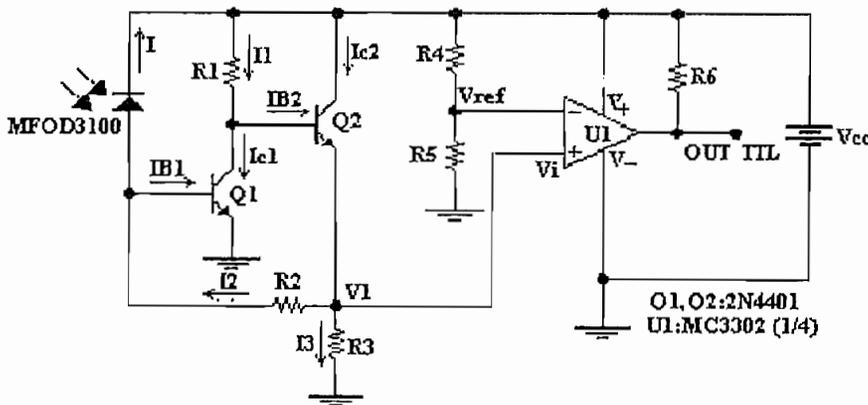


Figura 3.6 Circuito Receptor PIN

DATOS:

TRANSISTORES Q1 Y Q2: 2N4401

$h_{fe} = 80$ para $V_{CE} = 1 \text{ V}$; $I_c = 10 \text{ mA}$

INTEGRADO MC3302:

COMPARADOR (1 DE 4) DE 14 PINES

FOTODETECTOR: MFOD3100 O MFOD2404 (PREAMPLIFICADOR INCLUIDO)

Corriente de oscuridad: $I_D = 1 \text{ nA}$

Voltaje reverso: $V_R = 5 \text{ V}$

Responsividad del fotodetector a 850nm: $R = 0.3 \mu\text{A}/\mu\text{W}$; para $V_R = 5\text{V}$ y $P = 10 \mu\text{W}$

DESARROLLO:

Por las especificaciones del fotodetector a usar, se lo puede polarizar con un voltaje de:

$V_{cc} = 5 \text{ V}$

Entonces:

$$I_{B2} = I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE}} = \frac{10 \text{ mA}}{80} = 125 \mu\text{A}$$

La fotocorriente I que se genera en el fotodetector, se obtiene de su valor de responsividad (R) a la longitud de onda de trabajo; es decir:

$$I = R * P = 0.3 \frac{\mu\text{A}}{\mu\text{W}} * 10 \mu\text{W} = 3 \mu\text{A}$$

Analizando las corrientes y voltajes presentes en el circuito de la figura 3.6, se tiene:

$$I_2 = I + I_{B1} = 3 \mu\text{A} + 125 \mu\text{A} = 128 \mu\text{A}$$

$$I_3 = I_{C2} - I_2 = 10 \text{ mA} - 128 \mu\text{A} = 9.872 \text{ mA}$$

$$I_1 = I_{C1} + I_{B2} = 10 \text{ mA} + 125 \mu\text{A} = 10.125 \text{ mA}$$

$$V_{R3} = V_1 = V_{cc} - V_{CE2} = 5\text{V} - 1\text{V} = 4\text{V}$$

$$V_{R2} = V_{R3} - V_{BE1} = 4V - 0.6V = 3.4V$$

$$V_{R1} = V_{cc} - V_{BE2} - V_{E2} = 5V - 0.6V - 4V = 0.4V$$

$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I_1} = \frac{0.4V}{10.125mA} = 39.5\Omega$$

$$R_1 = 39\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{R2}}{I_2} = \frac{3.4V}{128\mu A} = 26.56K\Omega$$

$$R_2 = 27K\Omega$$

$$R_3 = \frac{V_1}{I_3} = \frac{4V}{9.872mA} = 405.18\Omega$$

$$R_3 = 470\Omega$$

Luego sigue la etapa de decisión, la que conforma el comparador MC3302 con las resistencias R_4 , R_5 , R_6 , donde:

$$V_{R5} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} * V_{cc}$$

donde: V_{R5} que ingresa por V- del integrado, es el voltaje de referencia (V_{ref}) el cual se comparará con la señal de entrada (V_i), que ingresa por V+ del integrado, para discriminar entre un 1_L y 0_L .

En esa configuración del integrado comparador, se cumple que:

Cuando $V_i < V_{ref}$ entonces OUT TTL = V- = 0 V

$V_i > V_{ref}$ entonces OUT TTL = V+ = 5 V

Que son los niveles de voltaje TTL, los cuales fueron transmitidos.

Entonces se tiene que:

$$V_{ref} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} * V_{CC}$$

Un nivel TTL de 0_L , es reconocido para voltajes entre 0.3 V y 0.7 V (aproximadamente 0 mA).

Por tanto un voltaje de referencia puede ser: $V_{ref} = 0.7 V$, entonces:

$$0.7V = \frac{R_5}{R_4 + R_5} * 5V$$

Sea: $R_5 = 15 K$ (para una corriente de $46 \mu A$). Esta resistencia por lo general es mayor de 10 Kohm, para obtener una mínima corriente, aproximadamente de 0 mA, que corresponde a un pulso 0_L .

Entonces: $R_4 = 100 K$

Para una corriente de salida de 5mA, equivalente a 1_L ; se tendrá una resistencia:

$R_6 = 1 K$

Si utilizamos el fotodetector MFOD2404, que posee un preamplificador incluido, se puede obviar el bloque de amplificación y directamente de la salida del fotodetector entrar en la etapa de decisión, que puede ser mediante el comparador.

3.4.3 MONTAJE DE TERMINALES ÓPTICOS

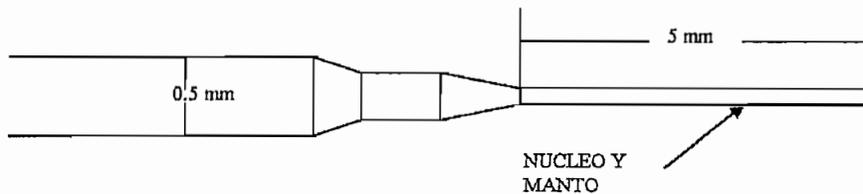
La fibra óptica mencionada en el enlace desarrollado es la fibra multimodo 62.5/125, que se muestra a continuación:



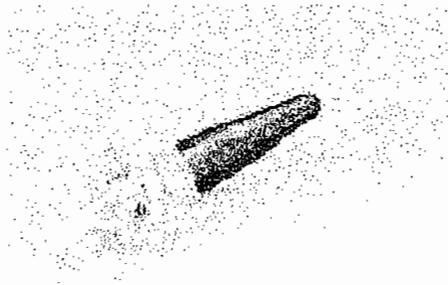
- diámetro del núcleo: $62.5 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$
- diámetro del manto: $125 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$
- diámetro del recubrimiento: $245 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$
- diámetro total de una fibra: 0.5 mm aproximadamente

En el extremo transmisor se debe fijar el conector tipo ST hembra AMP #228756-1 utilizado, el cual es compatible para utilizarlo con el emisor MFOE3100, además posee una perforación diametral de $150 \mu\text{m}$, para introducir la fibra, para lo cual debe fijarse cuidadosamente, de la siguiente manera:

- a) Se extrae la capa protectora (recubrimiento) de la fibra en una longitud de 5 mm, quedando sólo el núcleo y el manto, como se indica a continuación:



- b) Se rellena el conector macho ST con pegamento especial y se introduce la fibra a través de la perforación, luego de un período de un día de secado del pegamento, se procede a eliminar algún segmento de fibra restante mediante un proceso de pulido, puede ser utilizando lijas de diferente grosor, siguiendo el proceso mediante un microscopio, quedando finalmente la fibra óptica fijada en el conector macho ST de la siguiente manera:



- c) El emisor MFOE3100, se introduce en el conector hembra ST (AMP #228756-1), y está listo para unir los conectores macho y hembra ST.



En el extremo del receptor, se sigue el mismo proceso, ya que se utiliza un conector tipo AMP compatible con los fotodetectores MFOD3100 o MFOD2404.

3.5 AYUDA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO DE UN ENLACE ÓPTICO Y DE CIRCUITOS OPTOELECTRÓNICOS PRÁCTICOS UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS.

3.5.1 MANUAL DEL USUARIO

El manual del usuario menciona la forma de instalación y utilización del programa computacional denominado " COMUNICACIONES ÓPTICAS " desarrollado en Toolbook 1.51 y que corre bajo Windows 3.1 o superior, en la cual se encuentra amplia información de este tema, así como permite calcular ciertos parámetros útiles para el diseño de un enlace por fibra óptica.

Para correr la aplicación desarrollada, hay que instalar el programa fuente Toolbook, en el computador, para lo cual es necesario los siguientes requerimientos del sistema:

- Mínimo procesador 386
- Mínima velocidad de 66 Mhz
- Memoria RAM de 4Mb
- Mínimo despliegue de 256 colores y un área de pantalla de 640x480 píxeles
- Tarjeta de sonido de 16 bits o superior
- Mínimo espacio libre de disco duro:5 Mb
- Windows 3.1 o mayor

INSTALACIÓN DE TOOLBOOK 1.51 Y DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA

- ❖ Insertar el CD en la unidad D
- ❖ En el menú Inicio, escoger Ejecutar y seleccionar D:\Setup.exe
- ❖ En la ventana de *Multimedia Toolbook Setup*, escribir:

COPÝ TO y presionar *Continúe*

- ❖ Presionar Enter hasta terminar la instalación. Reiniciar el computador
- ❖ Copiar la carpeta D:\TOOLBOOK a la unidad C:\
- ❖ Ejecutar el archivo D:\TOOLBOOK\COMUNICACIONES OPTICAS\OPTICA.TBK.

Utilización de la Aplicación

Cuando se inicia la aplicación “ COMUNICACIONES OPTICAS “aparece el cuadro de contenido del libro desarrollado, como se indica en la figura 3.7.

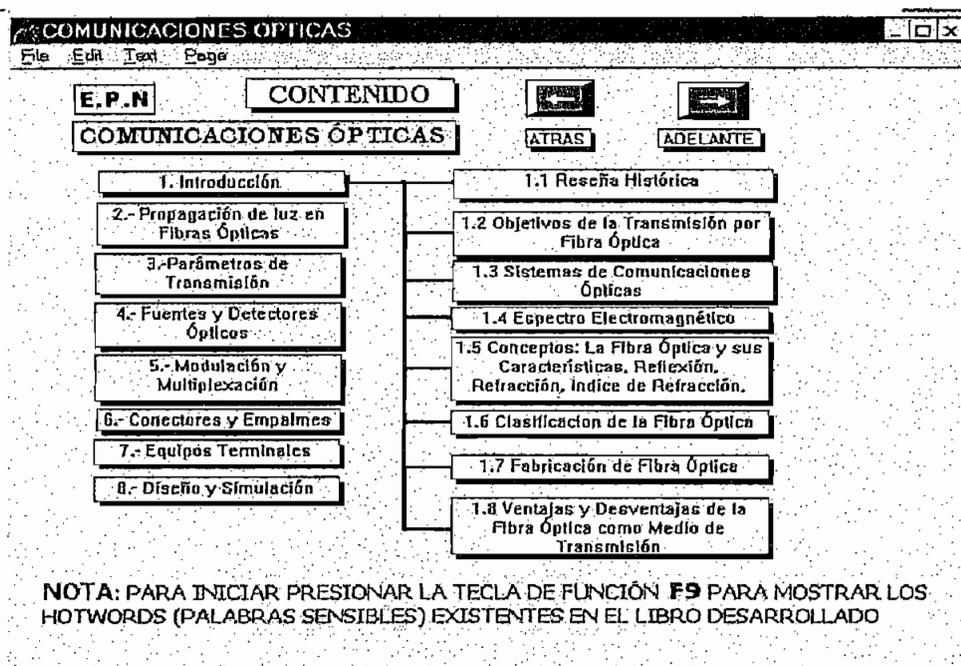


Figura 3.7 Pantalla de inicio de “ Comunicaciones Ópticas “

Las páginas del libro poseen los botones: *Atrás*, *Adelante* o *Siguiente* y *Al Contenido*, que permiten navegar por todas las pantallas, además se dispone de hotwords para ir cualquier página de interés, estos hotwords se representan por un rectángulo, cuando se coloca el mouse sobre el tema que queremos revisar, seguidamente con un clic podemos ir a la pantalla solicitada.

Como se puede observar en la pantalla de inicio del libro, se tiene 8 items para escoger, de los cuales, los siete primeros poseen información de Comunicaciones Ópticas, el último item posee tres opciones:

- Balance de un Enlace Óptico
- Cálculo de la distancia entre Regeneradores

- Diseño de un Enlace óptico Elemental y Simulación de circuitos optoelectrónicos usados en un enlace.

Al escoger la primera opción, se abre la pantalla que se muestra en la figura 3.8.

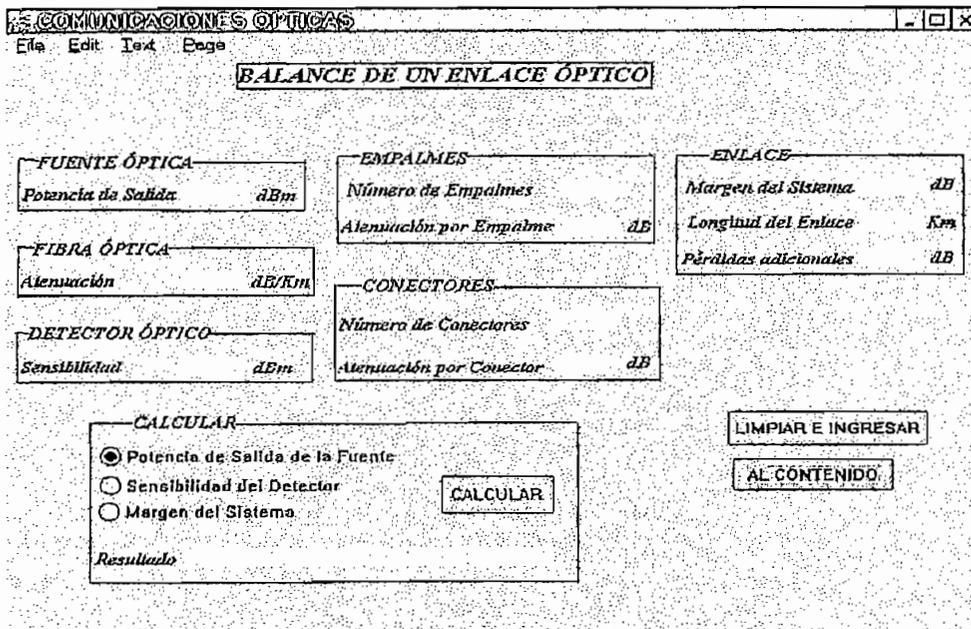


Figura 3.8 Pantalla para evaluar el Balance de un Enlace Óptico

En esta pantalla se puede evaluar el balance de pérdidas y potencias, presentes en un enlace por fibra óptica, el usuario puede elegir entre tres opciones de cálculo:

- ❖ **Potencia de salida.-** Calcula la potencia requerida a la salida del transmisor para cumplir ciertos requerimientos del sistema, que serán los datos a ingresar.
- ❖ **Sensibilidad del receptor.-** Calcula la sensibilidad que necesita el receptor para responder a la señal emitida por el transmisor.

- ❖ **Margen del sistema.-** Calcula el margen de seguridad que necesita el sistema para cubrir las degradaciones que se producen en un enlace óptico.

Es necesario escoger una de estas opciones antes de ingresar los datos.

Para ingresar los datos necesarios para el cálculo, se debe presionar el botón "LIMPIAR E INGRESAR", el cual borra los datos existentes y permite ingresar nuevos datos. Para calcular uno de los tres parámetros se presiona el botón "CALCULAR", obteniendo así el resultado.

En todas las páginas se dispone del botón "AL CONTENIDO", el cual lleva a la pantalla principal del libro desarrollado.

La segunda opción permite calcular la distancia máxima entre regeneradores para satisfacer los requerimientos del sistema indicados en la tabla de datos, como se muestra en la figura 3.9.

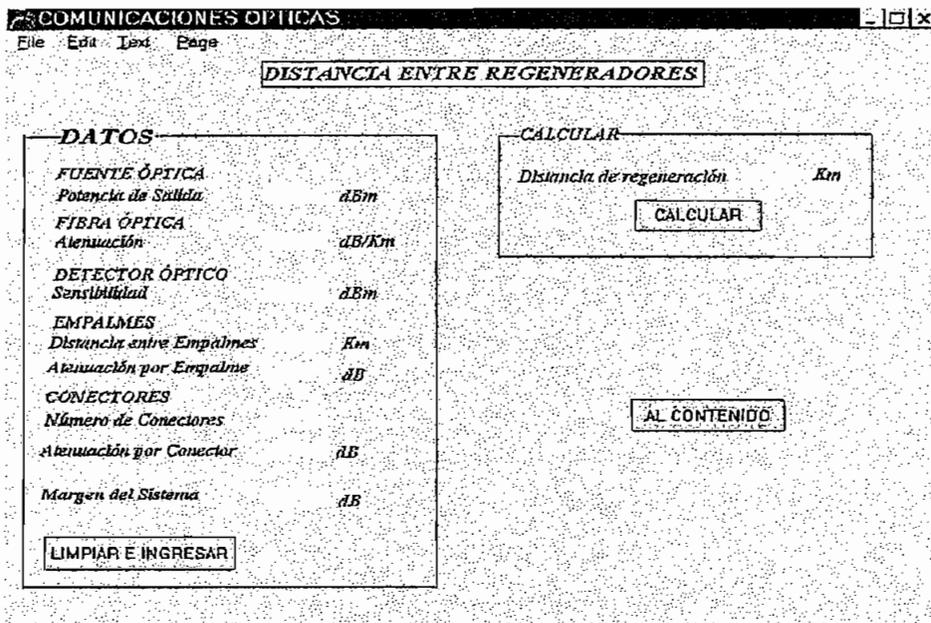


Figura 3.9 Pantalla para el cálculo de la distancia entre regeneradores

Para el cálculo de la distancia se utiliza el criterio de la Atenuación Máxima permitida en el sistema, para lo cual es necesario ingresar los datos indicados en la pantalla, mediante presionar el botón "LIMPIAR E INGRESAR", que borra los campos y permite el ingreso de nuevos datos. El botón "CALCULAR" muestra el resultado en el casillero de la distancia entre regeneradores.

La tercera opción muestra en varias pantallas el diseño de un enlace óptico elemental, mencionando el caso específico desarrollado en el presente trabajo.

En la figura 3.10, se muestra la pantalla de ingreso de datos, como son: la velocidad de transmisión, distancia y tasa de bits errados (BER), luego de ingresar estos valores, se presiona el campo denominado "Componentes Ópticos Recomendados", con lo cual se despliega en la parte derecha de la pantalla, el tipo de fuente óptica, detector óptico, longitud de onda de trabajo y tipo de fibra óptica, más idóneos para trabajar con estos requerimientos.

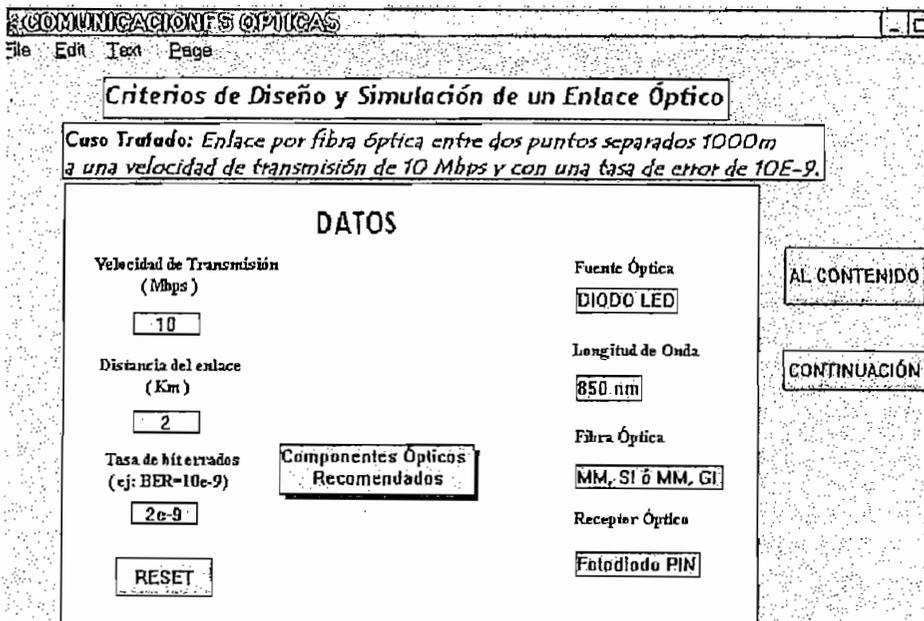


Figura 3.10 Pantalla para el ingreso de datos

Para poder ingresar nuevos datos, se debe limpiar los campos de velocidad de transmisión, distancia del enlace y tasa de bits errados, presionando el botón denominado RESET.

Al tener los elementos más idóneos, seguimos a la siguiente pantalla, presionando el botón "CONTINUACIÓN", para tener la pantalla que se indica en la figura 3.11.

Caso Tratado: Para el diseño realizado, los elementos a usar son: Fibra Óptica Multimodo 62.5/125: EIA-49 ISO 793, de 1000m de longitud, Fotodiodo PIN con preamplificador incluido de MOTOROLA: MFOD2404 o Fotodiodo PIN de MOTOROLA: MFOD3100, LED Infrarrojo de MOTOROLA: MFOE3100, Conectores AA tanto para el emisor como para el detector.

FIBRA ÓPTICA	DETECTOR ÓPTICO	FUENTE ÓPTICA	CONECTORES Y EMPALME
Apertura Numérica <input type="text" value="0.28"/>	Longitud de onda (nm) <input type="text" value="850"/>	Longitud de onda de emisión (nm) <input type="text" value="850"/>	Pérdida por conector (dB) <input type="text" value="0.5"/>
Índice de refracción del núcleo <input type="text" value="1.5"/>	Tasa de bits errados (BER) <input type="text" value="10e-9"/>	Potencia de emisión (uW) <input type="text" value="10"/>	Pérdida por empalme (dB) <input type="text" value="0"/>
Índice de refracción del manto <input type="text" value="1.47"/>	Tiempo de subida (tr) (ns) <input type="text" value="35"/>	Tiempo de subida tr (ns) <input type="text" value="19"/>	
Diámetro del núcleo (um) <input type="text" value="62.5"/>	Tiempo de bajada (tr) (ns) <input type="text" value="35"/>	Tiempo de bajada tf (ns) <input type="text" value="14"/>	
Diámetro del manto (um) <input type="text" value="125"/>	Potencia mínima de entrada (uW) <input type="text" value="2"/>		
Diámetro del recubrimiento (um) <input type="text" value="245"/>			
Longitud de Onda (nm) <input type="text" value="850"/>			
Atenuación (dB/Km) <input type="text" value="3.1"/>			
Ancho de banda (MHz) <input type="text" value="500"/>			
Dispersión Total (ns/Km) <input type="text" value="3"/>			
Alcance (Km) <input type="text" value="1"/>			

SIGUIENTE PASO DEL DISEÑO: BALANCE DE PERDIDAS Y CONTROL DE DISPERSIÓN

AL CONTENIDO

ATRAS

Figura 3.11 Pantalla para el ingreso de características ópticas

En esta pantalla se tiene campos que permiten el ingreso de las características ópticas de la fuente, fibra y detector ópticos, las cuales podemos encontrar en hojas de especificaciones de dichos elementos, para el caso específico tratado todas las características de los elementos utilizados, se mencionan en los ANEXOS.

Una vez ingresadas estas características, presionar el botón "SIGUIENTE PASO DEL DISEÑO", el cual lleva a la pantalla donde se realiza el balance de pérdidas y

potencias, y el control de dispersión, dichos parámetros indican la factibilidad de implementación del enlace. Esta pantalla se muestra en la figura 3.12.

En la cual se dispone de los botones: "INGRESAR OTRAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS" e "INGRESAR NUEVOS DATOS", que llevan a las páginas correspondientes. Se puede también observar los criterios de diseño del enlace, si se presiona el botón "VER CRITERIOS DE DISEÑO DEL ENLACE", que nos conduce a los criterios analizados para el diseño del enlace óptico descrito en este trabajo.

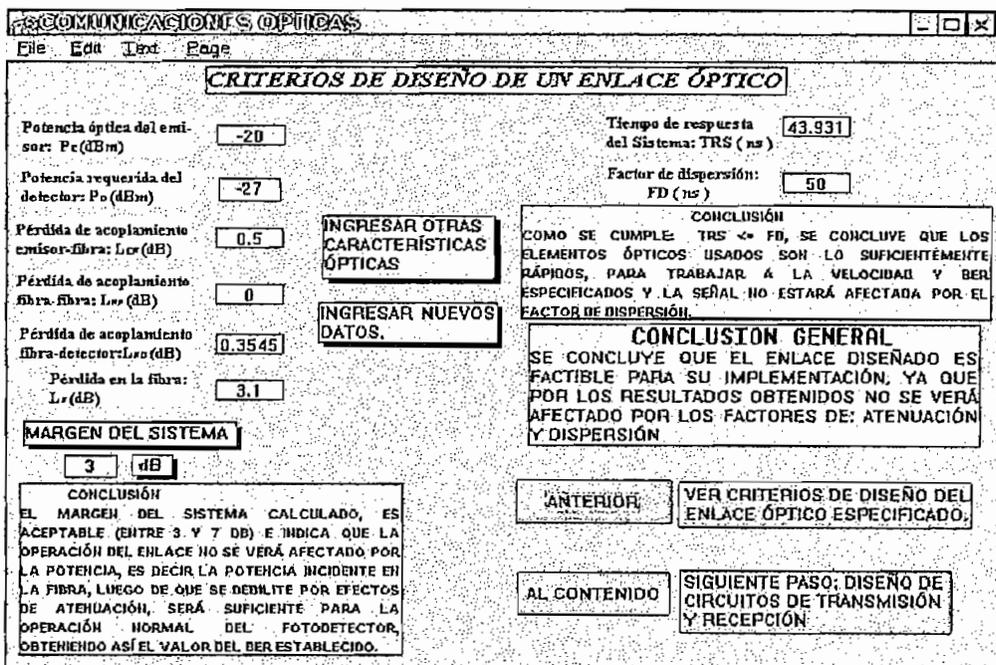


Figura 3.12 Pantalla de criterios de diseño del enlace.

Por último se describen los circuitos prácticos de transmisión y recepción, que pueden ser utilizados en enlaces de fibra óptica, estos se muestran en la figura 3.13, en esta pantalla se disponen de campos en los cuales se debe ingresar los datos de los elementos, que intervienen en el circuito optoelectrónico analizado, una vez ingresados dichos datos se debe presionar el botón denominado "CALCULAR" y se obtendrán los resultados, si se quiere ingresar nuevos valores para los elementos, presionamos el botón "LIMPIAR" y procedemos a colocar dichos valores.

Podemos observar el diseño del circuito implementado, al presionar el botón "VER DISEÑO DEL CIRCUITO". En esta pantalla también podemos observar la simulación del circuito, presionando el botón "SIMULACIÓN" el cual muestra las formas de onda de entrada y salida, que se relacionan con los pulsos luminosos que viajarán por la fibra óptica.

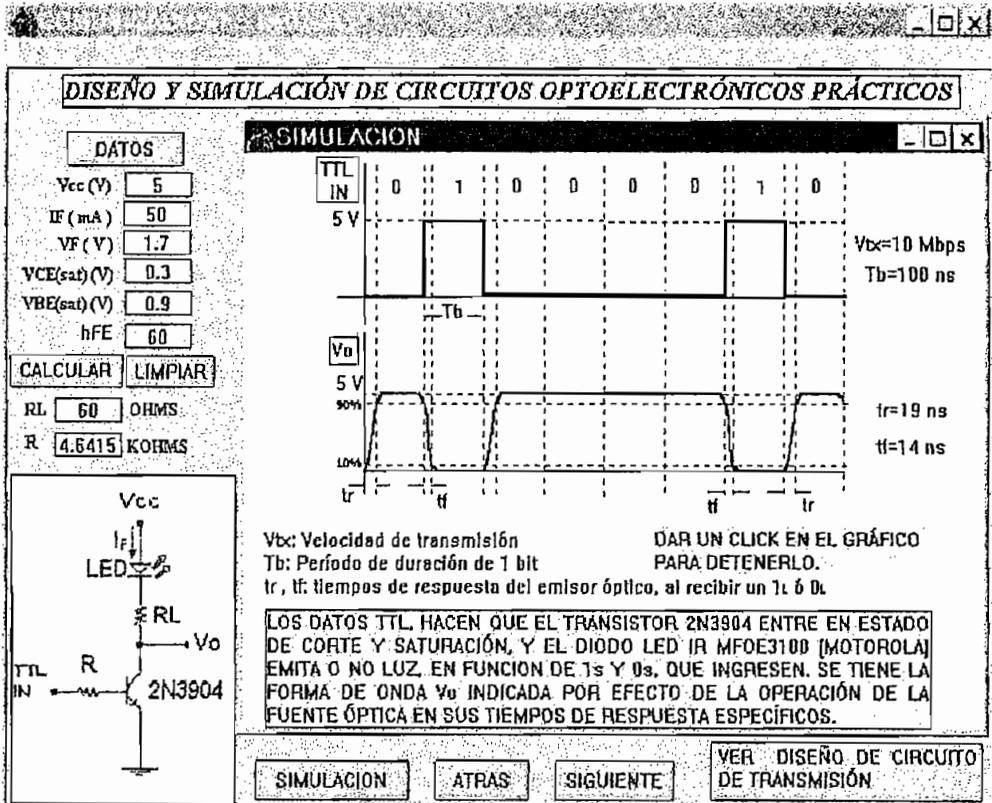


Figura 3.13 Pantalla de diseño y simulación de circuitos optoelectrónicos.

El libro desarrollado dispone de una contraseña para cambiar al nivel de autor y poder realizar cambios en la aplicación.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- ❖ El trabajo desarrollado en Multimedia Toolbook, denominado "PROGRAMA COMPUTACIONAL DIDÁCTICO PARA LA ASIGNATURA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS: TEORÍA , DISEÑO Y SIMULACIÓN", representa una aplicación multimedia del tipo tutorial, la cual es una herramienta computacional interactiva, entre el estudiante y el computador, de fácil manejo y comprensión, que incorpora texto, gráficos y audio.
- ❖ Existe en el mercado versiones más avanzadas de Multimedia Toolbook, las cuales facilitan mayormente el manejo de las herramientas que se tiene en Toolbook 1.5, inclusive la parte de programación se reduce al mínimo, lo que se refleja en el costo económico que representan estos paquetes computacionales.
- ❖ Debido a que la fibra óptica presenta mejores cualidades que otros medios de transmisión, su uso está difundándose rápidamente, por tanto la materia de Comunicaciones Ópticas, debe ser tomada en cuenta como principal para su aprendizaje.
- ❖ La aplicación desarrollada, servirá como base de consulta, porque dispone de suficiente información acerca de Comunicaciones a través de fibra óptica, así como criterios generales para diseñar enlaces ópticos, para lo cual se debe tener conocimiento de conceptos de Comunicación digital, principalmente.
- ❖ El avance tecnológico en lo que se refiere a hardware y software de computación, permite actualmente, que el computador sea una herramienta esencial en el desarrollo de las Industrias, como es el caso específico de la

Educación, haciendo que el aprendizaje sea más dinámico que los métodos tradicionales.

- ❖ Se concluye que es imprescindible la implementación de un Laboratorio para realizar prácticas de transmisión a través de fibra óptica, para lo cual se dispone de equipo necesario para su realización, como son fuentes, generadores de señal, osciloscopios, etc, los circuitos de transmisión y recepción pueden ser realizados fácilmente por los estudiantes, se puede adquirir fibra óptica de pequeña longitud, con lo que se podría realizar un sencillo enlace óptico, pero con la premisa de analizar el proceso de transmisión de la señal electro-óptica.

- ❖ La aplicación desarrollada puede ser ampliada en trabajos posteriores, centrándose específicamente en enlaces de mediana y gran capacidad, que forman parte de grandes redes de comunicación, las cuales serán en el futuro la mejor opción para transmitir información.

- ❖ Se recomienda poner énfasis en los adelantos tecnológicos, en el área de la Electrónica y Telecomunicaciones, así como incentivar al estudiante en la investigación de los campos de aplicación que se puede dar a la fibra óptica, como medio de transmisión del futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ RUBIO, Baltasar. " Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica ". Adisson Wesley. Buenos Aires 1994.
- ❖ VANCEK, Eligius. Sistemas de Comunicación a través de Fibra Óptica". Universidad de Santiago de Chile. 1986.
- ❖ MAHLKE, Gunther y GOSSING, Peter. " Conductores de Fibra Óptica ". Marcombo, Barcelona., 1987.
- ❖ TUR TERRASA, Juan y MARTINEZ, Rosario. " Todo sobre las fibras ópticas". Marcombo, Barcelona, 1989.
- ❖ TANENBAUM, Andrew. " Redes de Computadoras ". Tercera edición. Prentice – Hall Hispanoamericana.
- ❖ Optoelectronics Device Data – Mototrola Inc. 1987
- ❖ Optoelectronics – Image – Sensor Data Book. Texas Instruments - 1987.

REVISTAS

- ❖ Saber Electrónica. Edición No 4-01. Número de Colección 20. Editada por SERVI-EDIT INT´L INC. Ecuador.
- ❖ Saber Electrónica. No de colección 100. Año 11. Editorial Televisa Internacional S.A, Ecuador.

SITIOS WEB

- ❖ <http://www.fibercom.com.ar/apertura%20numerica.htm>

- ❖ http://www.geocities.com/Yosemite/8753/fibra_optica/fibra8.htm
- ❖ <http://lupus.worldonline.es/ivantrue/ingenieriayelectronica.htm>
- ❖ <http://www.cekit.com.co/index.php>
- ❖ <http://www.unitec.edu.co/biblioteca/fibra/tm5fo.html>
- ❖ <http://www.ucbcba.edu.bo/carreras/ingsis/cursos/cursodelhaire/connect.htm>
- ❖ <http://www.ucbcba.edu.bo/carreras/ingsis/cursos/cursodelhaire/fotheori.html>
- ❖ <http://www.fibraoptica.com/cobreofibra.htm>
- ❖ <http://www.fibercom.com.ar/quessa.htm>
- ❖ <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/74/multiplex/wdm.html>
- ❖ <http://www.geocities.com/SiliconValley/Circuit/3779/redes.html>
- ❖ <http://www.cienciasmisticas.com.ar/electro/diodos1.html>
- ❖ http://obelix.umh.es/99-00/teleco_sist/fop1/public_html/subwebs/2.htm
- ❖ <http://www.fibercom.es/productos/html/spa/acopladores.htm>
- ❖ <http://www.ciclistas.org/Firetown/wdm/wdm.html>
- ❖ <http://catalog.tycoelectronics.com/TE/bin/TE.Menu?M=MENU&ID=10681&LG=1&l=13>

ANEXOS

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CIRCUITOS OPTOELECTRÓNICOS PRÁCTICOS

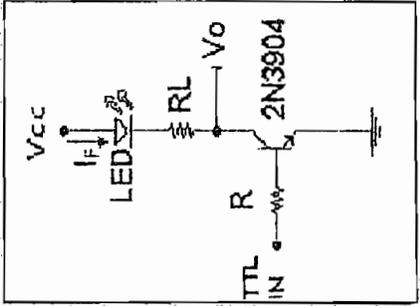
1.- TRANSMISOR TTL

DATOS

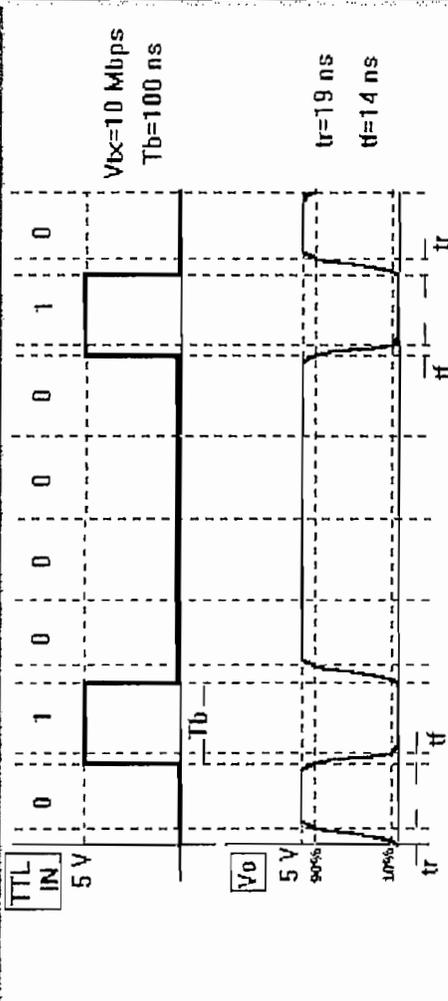
- Vcc (V)
- IF (mA)
- VF (V)
- VCE(sat) (V)
- VBE(sat) (V)
- hFE

CALCULAR LIMPIAR

- RL OHMS
- R KOHMS



CIRCUITO TRANSMISOR TTL



Vb: Velocidad de transmisión
 Tb: Período de duración de 1 bit
 tr, tf: tiempos de respuesta del emisor óptico, al recibir un 1 ó 0.

LOS DATOS TTL, HACEN QUE EL TRANSISTOR 2N3904 ENTRE EN ESTADO DE CORTE Y SATURACIÓN, Y EL DIODO LED IR MFOE3100 (MOTOROLA) EMITA O NO LUZ EN FUNCIÓN DE 1s Y 0s. QUE INGRESEN, SE TIENE LA FORMA DE ONDA Vo INDICADA POR EFECTO DE LA OPERACIÓN DE LA FUENTE ÓPTICA EN SUS TIEMPOS DE RESPUESTA ESPECÍFICOS.

SIMULACION ATRAS SIGUIENTE VER DISEÑO DE CIRCUITO DE TRANSMISIÓN

2.- RECEPTOR TTL

DATOS

Vcc (V) Vref (V)

VCE (V)

Ic (mA)

hFE

P (uW)

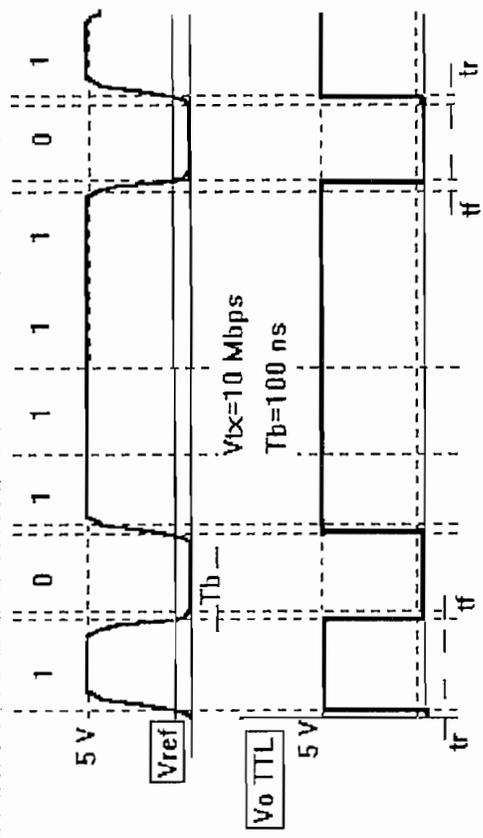
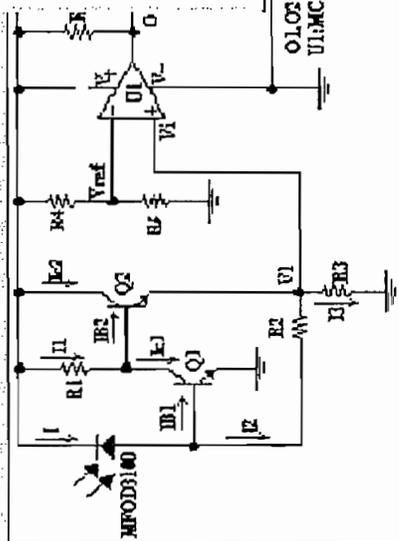
R (uA/uW)

CALCULAR

R1 OHMS R4 KOHM

R2 KOHM R5 KOHM

R3 OHMS R6 KOHM



Vtx: Velocidad de transmisión
 Tb: Período de duración de 1 bit

EN EL CIRCUITO MOSTRADO SE CUMPLE QUE:
 CUANDO $V_i < V_{ref}$ entonces $V_o = 0\text{ V}$
 $V_i > V_{ref}$ entonces $V_o = 5\text{ V}$
 OBTENIENDO ASÍ LOS BITS ENVIADOS POR EL TRANSMISOR

DAR UN CLICK EN EL GRÁFICO
 PARA ESCONDERLO.

3. Compuerta AND con fototransistores

Datos de fototransistores

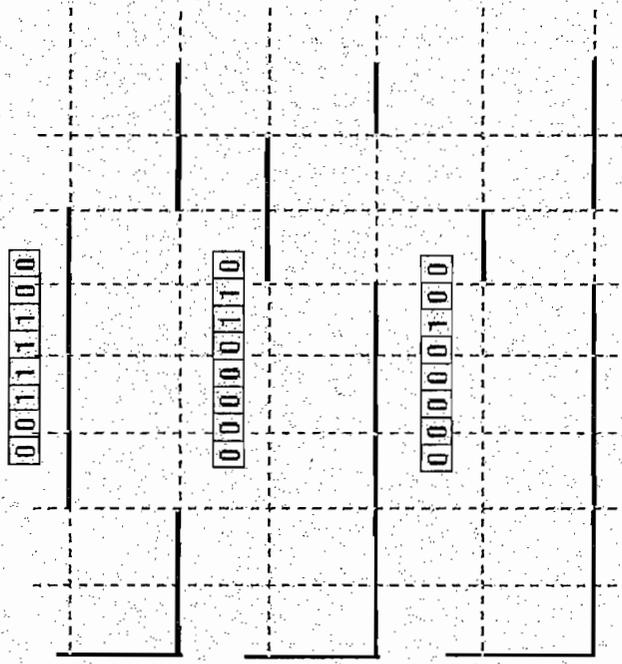
VCEmáxA V
 IcmáxA mA
 VCEmáxB V
 IcmáxB mA

Datos del circuito

Vcc V
 VCEsatA V
 VCEsatB V
 Ic mA

Resultados

RL KOHM
 Vo V



4. Fotodiodo IRED alimentado con una señal senoidal

DATOS

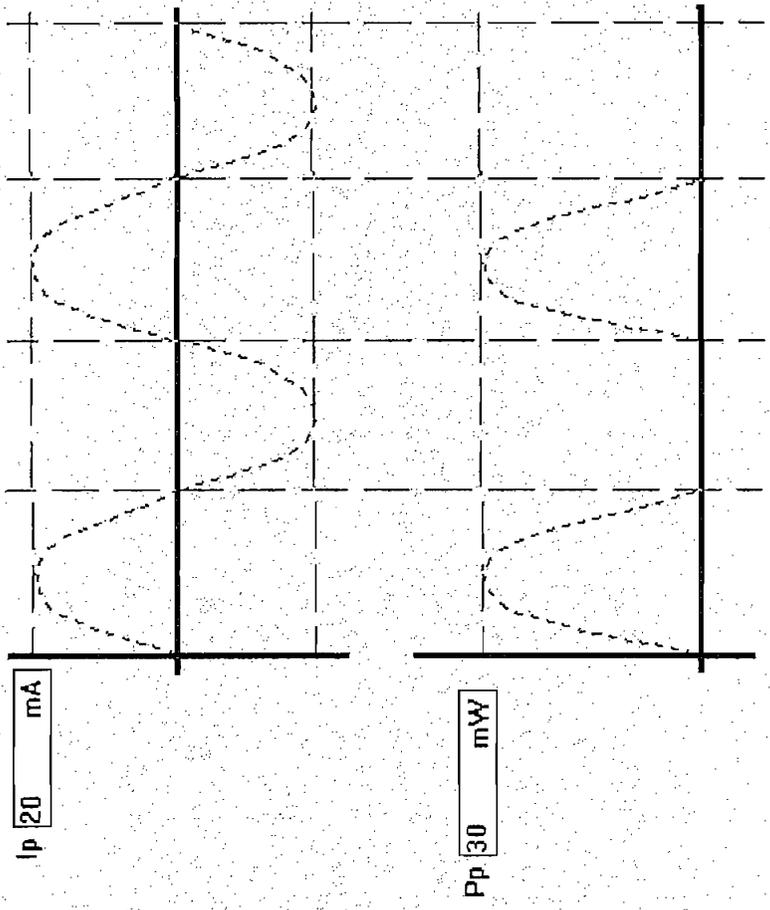
V_{inp} V
 $V_{F(IRED)}$ V
 P_p mW

Datos del fotodiodo

$I_{m\acute{a}x(IRED)}$ V
 $P(I_{m\acute{a}x})$ mW

RESULTADOS

R Kohms
 I_p mA



5. Circuito excitador de un diodo LED

DATOS

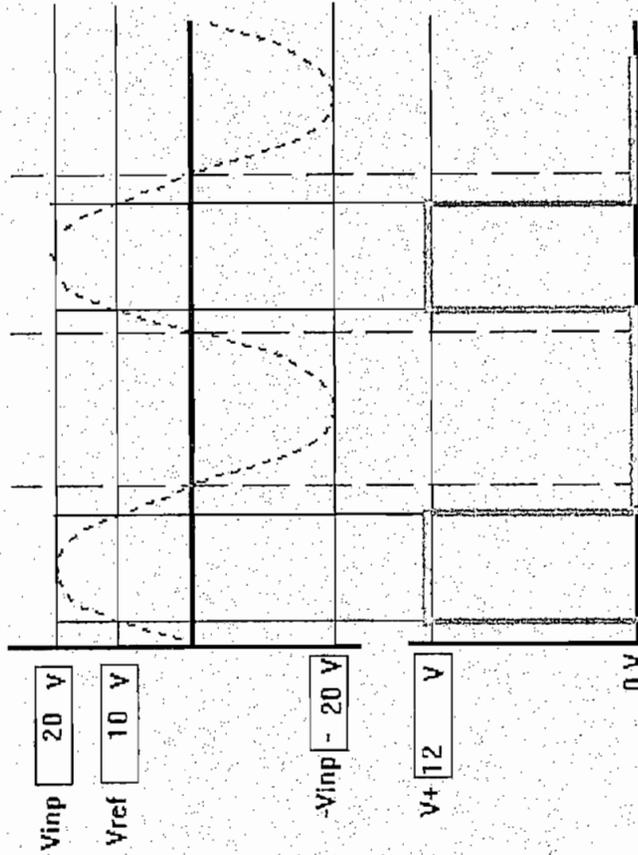
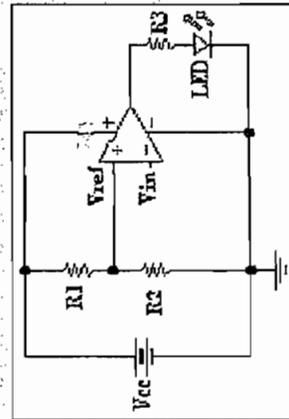
Vcc 12 V Vref 10 V
 Vd 1 V Vref 5 V
 Id 9 mA Vref 2.5 V
 Vref 10 V

Sea: V_{inp} 20 VSea: R₂ 5 Kohms

CALCULAR

R₁ 19 KohmsR₃ 1222.2 ohms

RESET



CURSOS

EN CONTINUO

**MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA**

**Fiber Optics — MOD Family
Photo Detector
Diode Output**

Designed for low cost, silicon, operation, in high frequency fiber optics systems. Modulated signal output for digital data processing. Modulated signal output for digital data processing. Modulated signal output for digital data processing.

- Fast Response — 5 ns Max. @ 5000
- Operating Frequency — 2.48 GHz Max. (Typ. 625 MHz)
- Performance Superior to Silicon Fiber Optics Systems
- Mounting Position — 50° Max. (See Mechanical Dimensions)
- Mass Produced with AMP #17855-1, American #154-1031, GFT #1000001
- Lead-Free

MAXIMUM RATINGS (TA = 25°C unless otherwise specified)

Rating Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	5	Volt
Power Dissipation (See Note 1)	50	mW
Operating Temperature	-55 to +125	°C
Storage Temperature	-55 to +125	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (TA = 25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Dark Current	I_D	5	10	20	nA
Reverse Saturation Current	I_{SA}	5	10	20	nA
Reverse Saturation Voltage	V_{SA}	0.5	1.0	2.0	Volt
Capacitance	C_j	1.0	1.5	2.0	pF
Response Time (See Note 2)	t_r	5	10	20	ns
Quantum Efficiency	η	50	60	70	%

OPTICAL CHARACTERISTICS (TA = 25°C)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Wavelength	λ	800	850	900	nm
Response Time (See Note 2)	t_r	5	10	20	ns

MFOD3100

**MOD FAMILY
FIBER OPTICS
PHOTO DETECTOR
DIODE OUTPUT**



MFOD3100

TYPICAL CHARACTERISTICS

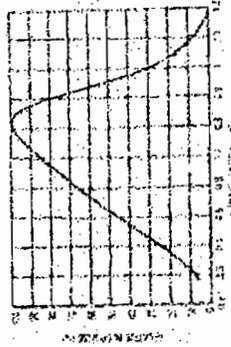


Figure 1. Response Spectral Response



Figure 2. Dark Current vs. Temperature

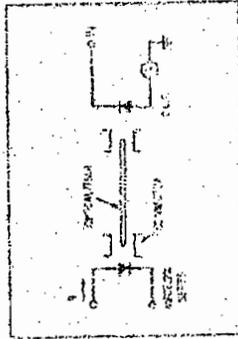


Figure 3. Responsivity Test Configuration

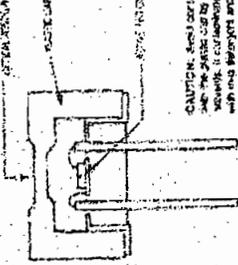
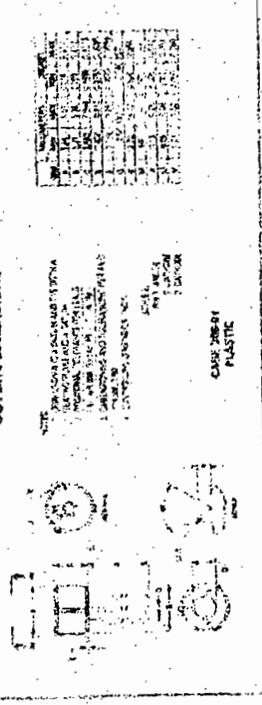


Figure 4. Package Cross Section

CAUTION: Avoid bending the fiber optic cable during assembly to prevent damage to the fiber optic cable and case.

OUTLINE DIMENSIONS



THESE DIMENSIONS ARE TYPICAL AND MAY VARY FROM THE DIMENSIONS SHOWN IN THIS DRAWING.

ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.

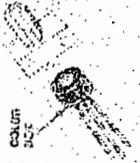
CASE MESH ALASTIC

CASE PLASTIC

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

Fiber Optics --- MOD Family
Infrared LED

- 1. Operating from 0°C to 100°C, the MOD Family provides high power and low cost infrared emitting diodes for use in a wide variety of applications. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 2. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 3. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 4. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 5. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 6. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 7. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 8. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 9. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.
- 10. The MOD Family is available in a variety of packages and is designed for high reliability applications.



MOD FAMILY
FIBER OPTICS
PREFERRED LTD

MANUFACTURING

Parameter	Symbol	Value	Unit
Maximum Power	P_{max}	1	Watt
Forward Current	I_F	100	mA
Reverse Current	I_R	10	μA
Forward Voltage	V_F	1.2 - 1.4	Volts
Dynamic Resistance	r_d	10 - 20	Ω
Storage Capacitance	C_s	10 - 20	pF
Turn-On Time	t_{on}	10 - 20	nsec
Turn-Off Time	t_{off}	10 - 20	nsec

OPTICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Symbol	Max	Typ	Min	Unit
Forward Power	P_F	10	5	1	mW
Forward Current	I_F	100	50	10	mA
Forward Voltage	V_F	1.4	1.2	1.0	Volts
Dynamic Resistance	r_d	10	5	1	Ω
Storage Capacitance	C_s	10	5	1	pF
Turn-On Time	t_{on}	10	5	1	nsec
Turn-Off Time	t_{off}	10	5	1	nsec

MFOE3100, MFOE3101

OPTICAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward Power	P_F	10	5	1	mW
Forward Current	I_F	100	50	10	mA
Forward Voltage	V_F	1.4	1.2	1.0	Volts
Dynamic Resistance	r_d	10	5	1	Ω
Storage Capacitance	C_s	10	5	1	pF
Turn-On Time	t_{on}	10	5	1	nsec
Turn-Off Time	t_{off}	10	5	1	nsec

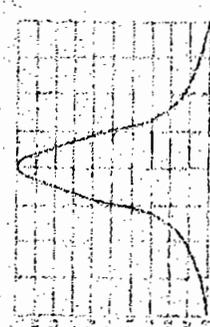


Figure 1. Relative Spectral Output



Figure 2. Microplated Output Power vs Forward Current



Figure 3. Relative Output Power vs Junction Temperature

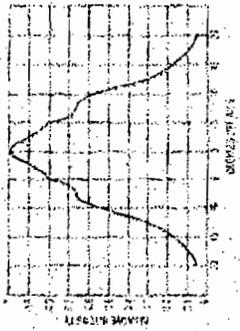


Figure 4. Radial Intensity Distribution

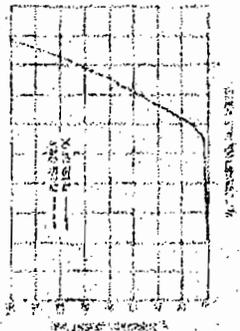


Figure 5. Forward Current versus Forward Voltage

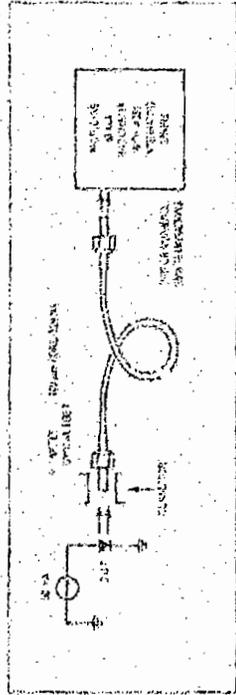


Figure 6. Coupling Efficiency

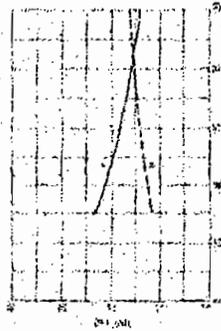


Figure 7. Rise Time and Fall Time versus Forward Current

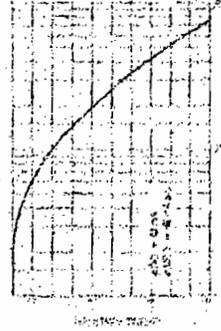


Figure 8. Typical LED Bandwidth

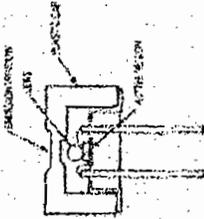


Figure 9. Package Cross Section

Fiber Core Diameter (μm)	APPROXIMATE COUPLING EFFICIENCY	
	Nominal Aperture	Scattered Aperture (%)
1000	24	53
1200	24	58
1500	27	63
2000	33	78
2500	42	88
3000	52	92

Figure 10. Coupling Efficiency

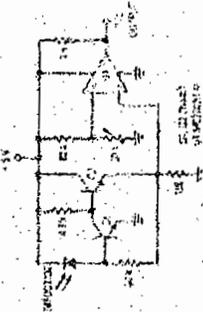


Figure 11. 1 MHz TTL Transmitter

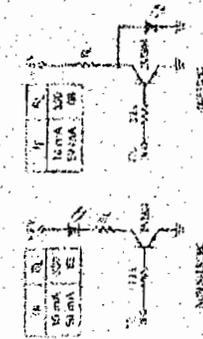
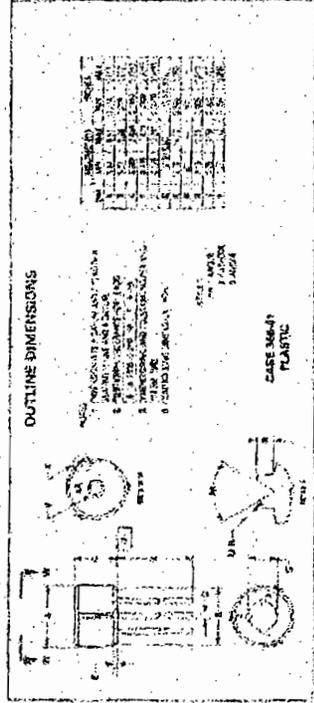


Figure 12. 1 MHz FM Receiver



2N3904

NPN EPITAXIAL PLANAR TRANSISTOR



DESCRIPTION

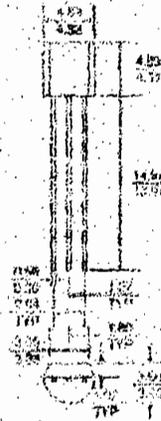
The 2N3904 is designed for general purpose switching and amplifier applications.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Maximum Temperatures	
Storage Temperature	-55 to +150 °C
Junction Temperature	+150 °C Maximum
Maximum Power Dissipation	
Total Power Dissipation ¹	625 mW
Maximum Voltages and Currents	
V _{CEO} Collector to Base Voltage	80 V
V _{CE0} Collector to Emitter Voltage	40 V
V _{EB0} Emitter to Base Voltage	5.0 V
I _C Collector Current	200 mA

¹ T_a = 25 °C

TO-18 Outline (mm)



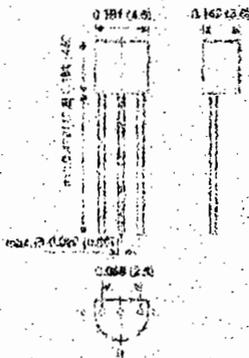
CHARACTERISTICS (T_a = 25 °C)

SYMBOL	MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM	UNIT	TEST CONDITIONS
V _{CE0}	50			V	I _C = 10 μA, I _E = 0
V _{CE0}	40			V	I _C = 1 mA, I _E = 0
V _{EB0}	5.0			V	I _E = 10 μA, I _C = 0
I _{CEX}			50	nA	V _{CE} = 30 V, V _{BE} = 3 V
V _{CE} (SAT) 1			200	mV	I _B = 1 mA, I _C = 10 mA
V _{CE} (SAT) 2			300	mV	I _B = 5 mA, I _C = 50 mA
V _{BE} (SAT) 1	650		850	mV	I _B = 1 mA, I _C = 10 mA
V _{BE} (SAT) 2			850	mV	I _B = 5 mA, I _C = 50 mA
h _{FE} 1	40				V _{CE} = 1 V, I _C = 100 μA
h _{FE} 2	70				V _{CE} = 1 V, I _C = 1 mA
h _{FE} 3	100		300		V _{CE} = 1 V, I _C = 10 mA
h _{FE} 4	50				V _{CE} = 1 V, I _C = 50 mA
h _{FE} 5	30				V _{CE} = 1 V, I _C = 100 mA
f _T	300			MHz	I _C = 10 mA, V _{CE} = 20 V, f = 100 MHz
C _{ob}			4.0	pF	V _{CB} = 6 V, f = 1 MHz, I _E = 0

2N4401

SMALL SIGNAL TRANSISTORS (NPN)

TO-92



Dimensions in inches and (millimeters)

FEATURES

- NPN Silicon Epitaxial Planar Transistor for switching and amplifier applications.
- As complementary type, the PNP transistor 2N4403 is recommended.
- On special request, this transistor is also manufactured in the pin configuration TO-18.
- This transistor is also available in the SOT 23 case with the type designation MMBT4401.

MECHANICAL DATA

Case: TO-92 Plastic Package
Weight: approx. 0.18g

MAXIMUM RATINGS AND THERMAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified

	SYMBOL	VALUE	UNIT
Collector-Base Voltage	V _{CB0}	60	Volts
Collector-Emitter Voltage	V _{CE0}	40	Volts
Emitter-Base Voltage	V _{EB0}	6.0	Volts
Collector Current-Continuous	I _C	600	mA
Power Dissipation at T _a =25°C Derate above 25°C	P _{tot}	625 5.0	mW mW/°C
Power Dissipation at T _c =25°C Derate above 25°C	P _{tot}	1.5 12	W mW/°C
Thermal Resistance Junction to Ambient Aθ	R _{θJA}	200	°C/W
Thermal Resistance Junction to Case	R _{θJC}	65.5	°C/W
Junction Temperature	T _J	150	°C
Storage Temperature Range	T _S	-55 to +150	°C