

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TEMA: PROGRAMA COMPUTACIONAL DIDACTICO PARA LA  
ENSEÑANZA DE LA OPTOELECTRONICA: TEORIA,  
DISEÑO Y SIMULACION.

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

XAVIER ALEXANDER CALDERON HINOJOSA

QUITO, JULIO DE 1998

**CERTIFICACION**

Certifico que la presente Tesis ha sido desarrollada en su totalidad  
por el Sr. Xavier Alexander Calderón Hinojosa.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Antonio Calderón Egas', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Ing. Antonio Calderón Egas.

**DIRECTOR DE TESIS**

Quito, julio de 1.998

## CERTIFICACION

Certifico que la presente Tesis ha sido desarrollada en su totalidad  
por el Sr. Xavier Alexander Calderón Hinojosa.

A handwritten signature in black ink, consisting of several large, overlapping loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

Ing. Nelson Díaz Moncayo.  
CO-DIRECTOR DE TESIS

Quito, julio de 1.998

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco de todo corazón a todas las personas que colaboraron en el desarrollo de la presente Tesis: familiares, amigos, compañeros, profesores y en especial al Ingeniero Antonio Calderón y al Ingeniero Nelson Díaz.*

## **DEDICATORIA**

*A Dios y a mis padres, por todo el amor, comprensión y guía dada a lo largo de mi vida para lograr mi formación integral, que ahora se ve reflejado en esta Tesis.*

# CONTENIDO

---

## INTRODUCCION

---

### CAPITULO I ENFOQUE Y SOLUCION DEL PROBLEMA USANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL.

---

1.1	GENERALIDADES .....	3
1.1.1	CARACTERISTICAS DE LA APLICACION A IMPLEMENTAR USANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL .....	4
1.1.2	ELECCION DEL HARDWARE Y SOFTWARE A UTILIZAR .....	7
1.1.2.1	Elección del Software .....	7
1.1.2.2	Elección del Hardware .....	8
1.1.3	¿QUE ES MULTIMEDIA? .....	9
1.1.4	¿QUE ES MULTIMEDIA TOOLBOOK? .....	9
1.1.4.1	Conceptos Básicos .....	10
1.2	DESARROLLO DE LA PROGRAMACION DEL MODULO TEORICO .....	15
1.2.1	INSERCIÓN DE TEXTO EN CADA PAGINA .....	18
1.2.2	CREACION DE BOTONES CON TEXTO DE AYUDA .....	19
1.2.3	CREACION DE BOTONES COMO CONTROLES DE NAVEGACION .....	19
1.2.4	INCLUSION DE HOTWORDS .....	20
1.2.4.1	Principales aplicaciones de los Hotwords .....	20
1.2.5	INCLUSION DE GRAFICOS .....	21
1.2.5.1	Pegando gráficos desde otros programas de Windows .....	22
1.2.5.2	Importando gráficos .....	22
1.2.5.3	Tipos de gráficos soportados por ToolBook .....	22
1.2.5.4	Inclusión de Ecuaciones .....	23

1.2.6	ANIMACION, AUDIO Y VIDEO .....	23
1.2.6.1	Integración de animación .....	24
1.2.6.2	Integración de audio .....	25
1.2.6.2	Integración de vídeo .....	26
1.2.7	MANEJO DE LOS OBJETOS DE PANTALLA .....	27
1.2.8	CONTROLES DE EFECTOS VISUALES .....	27
1.3	DESARROLLO DEL MODULO DE DISEÑO Y SIMULACION .....	28
1.3.1	PREGUNTAS Y REQUERIMIENTOS .....	28
1.3.2	IDENTIFICADORES DE OBJETOS .....	29
1.3.3	CONTENEDORES .....	29
1.3.4	LISTAS .....	30
1.3.5	EXPRESIONES .....	30
1.3.6	ESTRUCTURAS DE CONTROL .....	31
1.3.7	MENSAJES DEFINIDOS POR EL USUARIO .....	31
1.3.8	FUNCIONES DEFINIDAS POR EL USUARIO .....	31
1.4	MANUAL DE USUARIO .....	31
1.4.1	REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE PARA LA EJECUCION DEL PROGRAMA .....	31
1.4.2	MANUAL GENERAL DEL PROGRAMA .....	33
1.4.3	CARACTERISTICAS DEL MODULO DE DISEÑO Y SIMULACION .....	36

---

**CAPITULO II MODULO TEORICO. CONCEPTOS, PRINCIPIOS DE  
FUNCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LOS  
ELEMENTOS OPTOELECTRÓNICOS USADOS EN EL  
PROGRAMA.**

---

2.1	CONCEPTOS BASICOS .....	40
2.1.1	EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO .....	40
2.1.2	DEFINICIONES .....	41
2.1.2.1	Fuentes Luminosas .....	41
2.1.2.2	Unidades Básicas .....	42
2.1.3	ESQUEMA DE BANDAS Y LONGITUDES DE ONDA .....	43

2.1.4	ESQUEMA DE BANDAS EN EL AMBITO DE IMPULSO .....	45
2.1.5	SENSIBILIDAD ESPECTRAL DE DETECTORES .....	46
2.1.6	CONCEPTOS BASICOS DE ONDAS .....	48
2.1.7	REFLEXION .....	50
2.1.8	REFRACCION .....	51
2.1.9	REFLEXION TOTAL .....	54
2.1.10	APERTURA NUMERICA .....	55
2.1.11	MODOS DE PROPAGACION DE LA LUZ EN UNA GUIA DE ONDA CILINDRICA .....	57
2.1.12	TIPOS DE PERFIL DEL INDICE DE REFRACCION .....	58
2.2	EMISORES OPTICOS .....	60
2.2.1	EMISION ESPONTANEA .....	61
2.2.2	EMISION ESTIMULADA .....	62
2.2.3	TECNOLOGIA DE DIVERSOS DIODOS ELECTROLUMINISCENTES .....	63
2.2.4	DIODOS LUMINISCENTES .....	65
2.2.4.1	Diodos luminiscentes en el espectro visible .....	65
2.2.4.2	Aplicaciones .....	68
2.2.4.3	Diodos luminiscentes de rayos infrarrojos .....	68
2.2.4.4	Aplicaciones .....	71
2.2.4.5	IRED para guías de ondas ópticas .....	72
2.2.5	RENDIMIENTO OPTICO DE DIODOS LUMINISCENTES .....	73
2.2.6	ESTRUCTURAS BASICAS DE LOS DIODOS LUMINISCENTES .....	73
2.2.6.1	Diodo luminiscente con superficie de emisión extensa .....	74
2.2.6.2	Diodo Luminiscente tipo Burrus .....	74
2.2.6.3	Diodo Luminiscente tipo Burrus de Heteroestructura .....	75
2.2.7	CARACTERISTICA DE TRANSFERENCIA DE ENTRADA SALIDA DE LOS DIODOS LUMINISCENTES .....	76
2.2.8	AREA DE EMISION DE LOS DIODOS LUMINISCENTES .....	77
2.2.9	ESPECTRO DE LOS DIODOS LUMINISCENTES .....	77
2.2.10	DIODOS LASER (LD) .....	78
2.2.10.1	Resonador óptico .....	79
2.2.10.2	Funcionamiento del resonador óptico .....	80



	2.2.10.3 Coherencia .....	80
	2.2.10.4 Formación de los niveles .....	81
	2.2.10.5 La corriente de umbral .....	81
	2.2.10.6 Clases de estructuras del LD .....	82
	2.2.10.7 Efectos del Aluminio en el Ga y As .....	82
	2.2.10.8 Característica de transferencia de entrada/salida del diodos láser .....	83
	2.2.10.9 Espectro de los LD .....	84
	2.2.11 PRESENTACION VISUAL EN CRISTALES LIQUIDOS .....	85
2.3	RECEPTORES OPTICOS .....	87
	2.3.1 ABSORCION OPTICA .....	87
	2.3.2 GENERACION DE PORTADORES DE CARGA DE UN FOTODIODO .....	88
	2.3.3 CURVAS CARACTERISTICAS DE UN FOTODIODO .....	89
	2.3.4 CLASES DE FOTODIODOS .....	92
	2.3.4.1 Fotodiodo PN .....	92
	2.3.4.2 Fotodiodo PIN .....	93
	2.3.4.3 Fotodiodo APD .....	94
	2.3.5 FOTOTRANSISTOR .....	96
	2.3.6 CELULA SOLAR .....	99
	2.3.7 FOTORESISTENCIAS .....	103
	2.3.8 FOTOTIRISTORES .....	105
	2.3.9 COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LOS FOTODIODOS .....	106
	2.3.9.1 RC del diodo .....	107
	2.3.9.2 Difusión .....	107
	2.3.9.3 Retardo de portadores de carga .....	107
	2.3.9.4 Reducción de la amplificación a altas frecuencias .....	108
	2.3.10 RUIDO EN LOS FOTODIODOS .....	108
2.4	ACOPLADORES OPTICOS .....	110
	2.4.1 PARAMETROS DE LOS DISPOSITIVOS .....	111
	2.4.1.1 Relación de transferencia de corriente .....	112
	2.4.1.2 Resistencia de aislamiento .....	112
	2.4.1.3 Capacidad de aislamiento .....	112

2.4.1.4	Tensión de aislamiento .....	113
2.4.1.5	Efecto de campo .....	113
2.4.1.6	Conexión a la base .....	113
2.4.1.7	Velocidad de respuesta .....	114
2.4.2	OPTOACOPLADOR CON FOTOTRANSISTOR DE SALIDA .....	114
2.4.2.1	Relación entre la fotocorriente $I_p$ y la corriente $I_f$ .....	115
2.4.3	SALIDA CON FOTODARLINGTON .....	116
2.4.4	SALIDA CON FOTOTIRISTOR .....	117
2.4.5	SALIDA CON FOTOFET .....	119
2.4.6	BARRERA OPTICA PARA LA LECTURA DE UNA CINTA PERFORADA .....	119
2.5	FIBRAS OPTICAS .....	121
2.5.1	RESEÑA HISTORICA .....	121
2.5.2	ESTRUCTURA DE LA FIBRA OPTICA .....	123
2.5.3	CONSTRUCCION DE LA FIBRA OPTICA .....	124
2.5.4	CLASIFICACION DE LA FIBRA OPTICA .....	126
2.5.4.1	Según la distribución del índice de refracción .....	126
2.5.4.2	Según el modo de propagación .....	129
2.5.5	COMBINACION DE TIPOS DE FIBRAS OPTICAS .....	130
2.5.5.1	Fibras ópticas SI y SM .....	130
2.5.5.2	Fibras ópticas SI y MM .....	130
2.5.5.3	Fibras ópticas GI y MM .....	131
2.5.6	CLASIFICACION DE LAS FIBRAS OPTICAS SEGUN EL MATERIAL DEL DIELECTRICO .....	131
2.5.6.1	Fibra óptica de vidrio .....	131
2.5.6.2	Fibra óptica de múltiples componentes .....	131
2.5.6.3	Fibra óptica de plástico .....	132
2.5.7	CARACTERISTICAS DE LA FIBRA OPTICA .....	132
2.5.7.1	Atenuación en la fibra óptica .....	132
2.5.7.2	Dispersión en la fibra óptica .....	137
2.5.8	LIMITACION DEL ANCHO DE BANDA .....	139
2.5.9	DISPERSION DEL MATERIAL .....	141

2.5.10	DISPERSION MODAL .....	142
2.5.10.1	Dispersión modal de la fibra óptica SI .....	143
2.5.10.2	Dispersión modal de la fibra óptica GI .....	144
2.5.10.3	Dispersión de la guía de onda .....	144
2.5.11	ANCHO DE BANDA TOTAL .....	146
2.5.12	TECNOLOGIA DE FABRICACION DE LA FIBRA .....	147
2.5.12.1	Técnica del doble crisol .....	147
2.5.12.2	Técnicas para la obtención de la preforma .....	148
2.5.12.3	Fabricación de la fibra óptica .....	152

---

**CAPITULO III MODULO DE DISEÑO Y SIMULACION. METODOLOGIA  
 APLICADA EN EL DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE  
 ESTE MODULO.**

---

3.1	CIRCUITO BASICO CON DIODOS LED'S .....	155
3.2	CIRCUITO BASICO CON UN FOTODETECTOR .....	156
3.3	CIRCUITO BASICO CON FOTOTRANSISTORES EQUIVALENTE A COMPUERTAS LOGICAS .....	157
3.3.1	FOTOTRANSISTORES TRABAJANDO COMO COMPUERTA AND .....	159
3.3.2	FOTOTRANSISTORES TRABAJANDO COMO COMPUERTA NAND .....	160
3.3.3	FOTOTRANSISTORES TRABAJANDO COMO COMPUERTA OR .....	162
3.3.4	FOTOTRANSISTORES TRABAJANDO COMO COMPUERTA NOR .....	164
3.4	CIRCUITO BASICO CON FOTOTRANSISTOR EN EMISOR COMUN .....	165
3.5	CIRCUITO BASICO CON FOTOSCR .....	171
3.5.1	CIRCUITO BASICO GENERADOR DE IMPULSO POSITIVO .....	171
3.5.2	CIRCUITO BASICO GENERADOR DE IMPULSO NEGATIVO .....	173
3.6	CIRCUITO BASICO CON FOTOTRIAC .....	175
3.7	CIRCUITO BASICO IRED ALIMENTADO CON UNA SEÑAL SENOIDAL .....	177

3.8	CIRCUITO BASICO DE MODULACIÓN DE UNA SEÑAL SENOIDAL CON IRED .....	178
3.9	CIRCUITO BASICO DEMODULADOR CON FOTODIODO .....	181
3.10	CIRCUITO BASICO MODULADOR DE ONDA CUADRADA CON UN IRED .....	182
3.11	CIRCUITO BASICO ACOPLADOR DE FAMILIAS DIGITALES .....	184

---

CAPITULO IV	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....	187
-------------	----------------------------------	-----

---

---

## BIBLIOGRAFIA

---

## ANEXOS

---

## INTRODUCCION

Al uso de las radiaciones electromagnéticas en el rango de la longitud de onda óptica y su conversión en señales eléctricas se le ha denominado con el término de Optoelectrónica. La Optoelectrónica necesita de dos componentes básicos; una fuente de radiación como transmisor y un conversor fotoeléctrico como receptor.

Estos componentes que emiten ó son sensibles a la radiación en el rango ultravioleta, infrarrojo y visible, se les denomina "componentes optoelectrónicos".

Debido al gran número de aplicaciones que tiene la Optoelectrónica en nuestra vida diaria y fundamentalmente al gran desarrollo de las comunicaciones con elementos optoelectrónicos se ha vuelto de vital importancia el conocer los conceptos y teorías fundamentales que describen las características de estos elementos.

Es así que se ha querido hablar sobre los conceptos básicos y principios de los elementos que componen la Optoelectrónica; sabiendo que esta teoría no va a variar y más bien es en la que se van a basar todas las innovaciones futuras en el campo de la Optoelectrónica.

Tratando de darle una visión didáctica al estudiante se va a realizar una clasificación de la Optoelectrónica por los elementos básicos que la componen y recopilando la información de varios autores que contribuyan a la fácil comprensión de los conceptos.

Debido a que la Tesis se basa en la implementación de un programa en el primer capítulo del presente escrito se hablará sobre temas relacionados a la elección, instalación, manejo y facilidades que presta el programa; además de las herramientas necesarias para su instalación y uso.

En la segunda parte se tratará sobre una síntesis del contenido del módulo teórico implementado en el programa; es decir, estará un resumen de los conceptos básicos, principios de funcionamiento y características de los elementos optoelectrónicos vistos.

Por último se verá brevemente la metodología usada para el diseño de los diferentes circuitos implementados en el módulo de diseño y simulación del programa tutorial.

Se espera que este documento y el programa desarrollado sirvan para que las personas interesadas en este campo se motiven a conocer sobre el amplio contenido de la Optoelectrónica y que al estudiante le sirva como una base para comprender de una manera sencilla el manejo de los componentes optoelectrónicos y le incentive a la ampliación y actualización de la materia y del programa didáctico desarrollado en este trabajo.

## CAPITULO I

# ENFOQUE Y SOLUCION DEL PROBLEMA USANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL.

### 1.1 GENERALIDADES

Los avances tecnológicos de los últimos tiempos en el software y principalmente en el hardware de los computadores personales, como por ejemplo, los microprocesadores actuales con una alta velocidad de procesamiento de datos (133 MHz) , los discos duros de alta capacidad de almacenamiento de datos (2.1 GBytes) , los CD's ROM de alta capacidad de almacenamiento (todos estos elementos de alta confiabilidad y durabilidad), han ocasionado que se trate de almacenar la información ya no a través de la tinta y el papel sino a través de campos magnéticos y discos duros ó mediante luz y CD's; es decir con la ayuda de la computadora.

Además el aumento en la demanda de los computadores personales (que implica un aumento en la producción) han permitido rebajar los costos de un computador personal y en consecuencia en la actualidad la mayor parte de la población mundial trata y logra adquirir esta herramienta de trabajo.

Las condiciones antes expuestas han ocasionado que las Instituciones dedicadas a la enseñanza y formación de los estudiantes procuren modernizar sus métodos de Pedagogía. Para lograr este objetivo se está almacenando cualquier tipo de información en la memoria de los computadores personales para que sirvan de consulta a los usuarios (en este caso estudiantes) y principalmente se está tratando de implementar programas computacionales que permitan la autoeducación de los estudiantes, o de cualquier

persona que desee hacerlo, simplemente a través de la interacción del usuario y el computador.

Pero para lograr la autoeducación de cualquier persona es necesario usar un paquete computacional que permita la presentación de la información al usuario de una manera simple, comprensible, didáctica y guiada. Para ésto en la actualidad tenemos una gran variedad de paquetes orientados al desarrollo de aplicaciones de tipo tutorial y en general de tipo multimedia\* .

Aunque hemos hablado de un abaratamiento en los costos de los computadores personales, el uso de ciertos paquetes computacionales, especialmente los que pueden manejar vídeo y sonido, ocasionan todavía un costo económico que lo podemos considerar alto para el medio en el que vivimos, ya que implica el adquirir ciertos componentes adicionales como son: la tarjeta digitalizadora de vídeo, las tarjeta digitalizadora de sonido, etc.

En consecuencia con las características que debe y le vamos a dar a nuestra aplicación y tomando en cuenta siempre el factor económico elegiremos el paquete computacional más adecuado para el desarrollo de la misma. Para nuestro caso desarrollaremos un Programa Computacional Didáctico para la enseñanza de la Optoelectrónica: Teoría, Diseño y Simulación.

### **1.1.1 Características de la aplicación a implementar usando un programa computacional**

Como el principal objetivo de esta tesis es desarrollar un programa computacional DIDACTICO, entonces debemos buscar un paquete que pueda trabajar en forma integral como mínimo con:

- Texto,
- Gráficos,
- Animación ,

---

\* Del término multimedia se hablará más adelante.



- Hipertexto<sup>\*</sup>, y
- Posibilidad de navegación.

Además debemos tener en cuenta que vamos a necesitar de ciertas expresiones matemáticas para el desarrollo del diseño de ciertos circuitos aplicativos de la Optoelectrónica y el paquete debe permitir la graficación de ciertas funciones que le permitan al usuario<sup>\*</sup> el observar la variación del resultado de algún circuito con la variación de los datos de entrada.

De lo anteriormente expuesto nos damos cuenta que necesitamos de un Software Multimedia que tiene varias herramientas que hacen factible integrar en un sólo bloque: texto, posibilidad de navegación, gráficos y animación. Además de sonido y vídeo, éstas dos últimas no necesarias para el desarrollo de esta aplicación pero si indispensables para futuras ampliaciones y mejoras al programa. Es decir debe manejar un editor de texto, un editor de gráfico, un sistema para realizar enlaces y manejadores (drivers) que permitan reconocer la existencia o no de tarjetas de sonido y vídeo y posibiliten su integración al bloque. Estos procesos deben ser transparentes para el usuario final y de la forma en que se realicen depende de la Casa Programadora.

Realmente el sistema operativo que vamos a usar para la ejecución del programa debe ser cualquiera que permita la utilización del Software Multimedia a usarse; pero idealmente deseáramos un paquete que puede ejecutarse en cualquier sistema operativo sea este: DOS, Windows 3.1 o Windows'95, es decir, que sea totalmente transparente al usuario.

Para lograr todo lo anteriormente explicado, se desarrollará un programa que trabaje en un solo ambiente de trabajo pero que estará compuesto por dos grandes módulos; a saber:

- Módulo Teórico, y
- Módulo de Diseño y Simulación.

---

<sup>\*</sup> Al hipertexto se lo define como una forma no lineal o tridimensional de presentar la información textual. Es el propio texto que mediante hiperenlaces permite navegar a través de la información. Estos hiperenlaces representan asociaciones conceptuales entre palabras, y otras partes de la información.

<sup>\*</sup> Al referirnos a usuario lo hacemos a cualquier persona que desee comprender los conceptos básicos de Optoelectrónica, pero se aconseja que se debería tener por lo menos algún curso previo de electrónica.

El Módulo Teórico abarcará los conceptos básicos, gráficos, animaciones, enlaces, expresiones matemáticas, etc., que permitan el fácil aprendizaje de la materia, en este caso de la Optoelectrónica.

El Diseño y la Simulación de circuitos básicos Optoelectrónicos se lo hace en un sólo módulo ya que estos procesos están íntimamente relacionados entre sí. Además con esto logramos que el estudiante asimile de una manera más fácil el aprendizaje de los conceptos vistos en el Módulo Teórico, ya que pueden observar en una misma pantalla la variación del resultado (simulación) según los diferentes datos de entrada ingresados para el diseño del circuito Optoelectrónico.

Tal vez lo ideal sería usar simuladores comerciales ya existentes de elementos optoelectrónicos pero el primer inconveniente es el costo de éstos y además no se tendría la facilidad de ver en una sola pantalla el diseño y simulación de un circuito con lo que se perdería en la didáctica del programa.

El Módulo de Diseño y Simulación estará compuesto, como su nombre lo indica, por pantallas en las cuales el usuario pueda ingresar los datos de circuitos optoelectrónicos básicos para ser diseñados automáticamente y simulados también automáticamente (en una misma pantalla). El objetivo principal de este Módulo es que el usuario puede comprender mejor los conceptos expuestos en el Módulo Teórico y que aprenda a diseñar circuitos en los que se tengan elementos optoelectrónicos.

## **1.1.2 Elección del Software y Hardware a utilizar**

### **1.1.2.1 Elección del Software**

En el mercado mundial existen una gran cantidad de paquetes computacionales que nos pueden permitir desarrollar nuestra aplicación multimedia. A éstos se los puede dividir en dos grandes grupos:

- Los programas utilizados para el desarrollo específico de aplicaciones multimedia.

- Los paquetes utilizados para realizar otro tipo de aplicaciones que, aunque no necesariamente sean orientadas a multimedia, puedan tener interfaces que nos permitan agregar características de este tipo.

Dentro de los primeros se ubican paquetes tales como:

- Multimedia ToolBook,
- Multimedia CBT,
- Director Windows and Mac Macromedia,
- Interactive Windows, y
- Multimedia Grasp DOS.

Todos estos paquetes computacionales con precios superiores a los US\$ 800.

En la otra categoría el más importante es:

- Visual Basic

De entre el primer grupo de paquetes computacionales nombrados la elección de Multimedia ToolBook fue sencilla, ya que era el único paquete disponible en el mercado nacional y por las facilidades que tenía éste en cuanto al manejo de texto, gráfico, sonido, vídeo y animación.

Para elegir entre Multimedia ToolBook y Visual Basic el asunto fue más complicado, debido a que los dos paquetes se encuentran fácilmente en el mercado nacional; a continuación daremos las principales características de los dos paquetes; a saber:

Multimedia ToolBook:

- Es un paquete netamente orientado a realizar aplicaciones tutoriales en ambiente multimedia.
- Es un paquete que **no** ocupa una gran cantidad de memoria para su instalación. (aproximadamente 20MB en disco duro y 4 MB en RAM)
- **No** ocupa una gran cantidad de memoria en la realización de las **aplicaciones** .
- Es un paquete cuyo proveedor está sacando nuevas versiones al mercado continuamente.
- Es un paquete que implementa animaciones muy fácilmente.

**Visual Basic:**

- Es un paquete que se lo usa más como lenguaje de programación con una gran capacidad de manejo de operaciones matemáticas y graficación de funciones.
- Es un paquete que ocupa una gran cantidad de memoria para su instalación (60 MB en disco duro y 8 MB en RAM).
- Ocupa una gran cantidad de memoria en la realización de aplicaciones y es necesario poseer el paquete profesional para poder compilar las aplicaciones que se realicen, si no se tiene esta versión es necesario instalar todo el paquete para poder correrlas en forma eficiente.
- No es un paquete orientado a realizar aplicaciones multimedia, por ejemplo no presenta un fácil manejo de textos, gráficos y sonido; con lo que a veces es necesario usar el Sistema de Ayuda de Windows Integrado para crear archivos de ayuda en los que se puede incluir texto, gráficos y sonido.
- Tiene una gran facilidad para manejar aplicaciones y dispositivos diferentes a su entorno, tales como bases de datos o módems.

Luego de haber observado y manejado las diferentes características de los paquetes Multimedia ToolBook y Microsoft Visual Basic decidimos usar como herramienta de trabajo el paquete Multimedia ToolBook ya que es el paquete que más se ajusta a las características que tiene nuestro programa a desarrollar y la única principal desventaja que tiene Multimedia ToolBook frente a Visual Basic es el manejo de expresiones matemáticas no muy extensas; pero como sabemos nuestro tutorial no necesita del manejo de operaciones matemáticas muy complejas.

**1.1.2.2 Elección del Hardware**

Para el desarrollo del PROGRAMA COMPUTACIONAL DIDACTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA OPTOELECTRONICA: TEORIA, DISEÑO Y SIMULACION; vamos a usar el paquete Multimedia ToolBook (versión 3.0) para lo cual requerimos de un computador personal con las siguientes características básicas y mínimas\* :

- Computador 386 DX,
- Velocidad de procesamiento de 40 MHz,

---

\* Las características mínimas del computador personal se refieren a que podemos usar cualquier otro computador que tenga mejores características básicas de las mencionadas aquí.

- Memoria RAM de 2 MB,
- En disco duro 20 MB libres,
- Sistema Operativo Windows 3.1 (como mínimo) ó Windows 95<sup>\*</sup>,
- Monitor preferiblemente a color, y
- Un driver (controlador) de 3½.

### 1.1.3 ¿ Qué es Multimedia ?

En general el término MULTIMEDIA se define como el uso de múltiples medios para expresar algo a alguien. Para nuestro caso en particular, es decir la aplicación de la multimedia a la informática y, de manera específica, al desarrollo de paquetes orientados a la enseñanza, se puede decir también que multimedia es simplemente una forma de presentar la información utilizando una combinación de tecnologías audiovisuales. Es decir, en forma general se entiende como multimedia a la combinación de texto, gráficos, animación, vídeo, audio; pero no necesariamente de todos a la vez, ya que bastaría con utilizar dos de los medios anteriores para hablar de multimedia.

### 1.1.4 ¿ Qué es Multimedia ToolBook ?

Multimedia ToolBook es un paquete desarrollado por Asymetrix Corporation, orientado a aplicaciones educativas de tipo hipertexto, que posee las características mencionadas como necesarias para ser considerado como un paquete apto para su utilización en multimedia. ToolBook trabaja en un ambiente gráfico llamado Microsoft Windows.

ToolBook trabaja con un lenguaje denominado OpenScript (escrito abierto), que es un lenguaje de alto nivel orientado a objetos, razón por la cual su sintaxis tiene una concepción diferente a la de otros lenguajes de alto nivel.

Su campo de acción es muy amplio. A pesar de que este trabajo ha sido desarrollado con una versión antigua, sus potencialidades son amplias haciendo que el trabajo sea más amplio y agradable. Además posee un editor de texto y un editor de gráficos integrados, por otra parte, mediante software, se puede acceder al manejo de los drivers para sonido

---

\* Con Windows'95 y con un computador 386 se necesita 8 MB en RAM.

y animación, haciendo que el paquete cumpla con los requerimientos necesarios para realizar aplicaciones de tipo tutorial, como la presente.

La aplicación ToolBook, de uno o más libros, puede estar diseñada para un propósito particular, tal como capacitación, administración de información o entretenimiento. El grado de desarrollo de estos libros está limitada únicamente por los conocimientos, tanto del paquete como del tema específico del que se trate la aplicación y del grupo de personas dedicadas al desarrollo de la misma. En la figura 1.1 se muestra el ambiente de trabajo de Multimedia ToolBook.

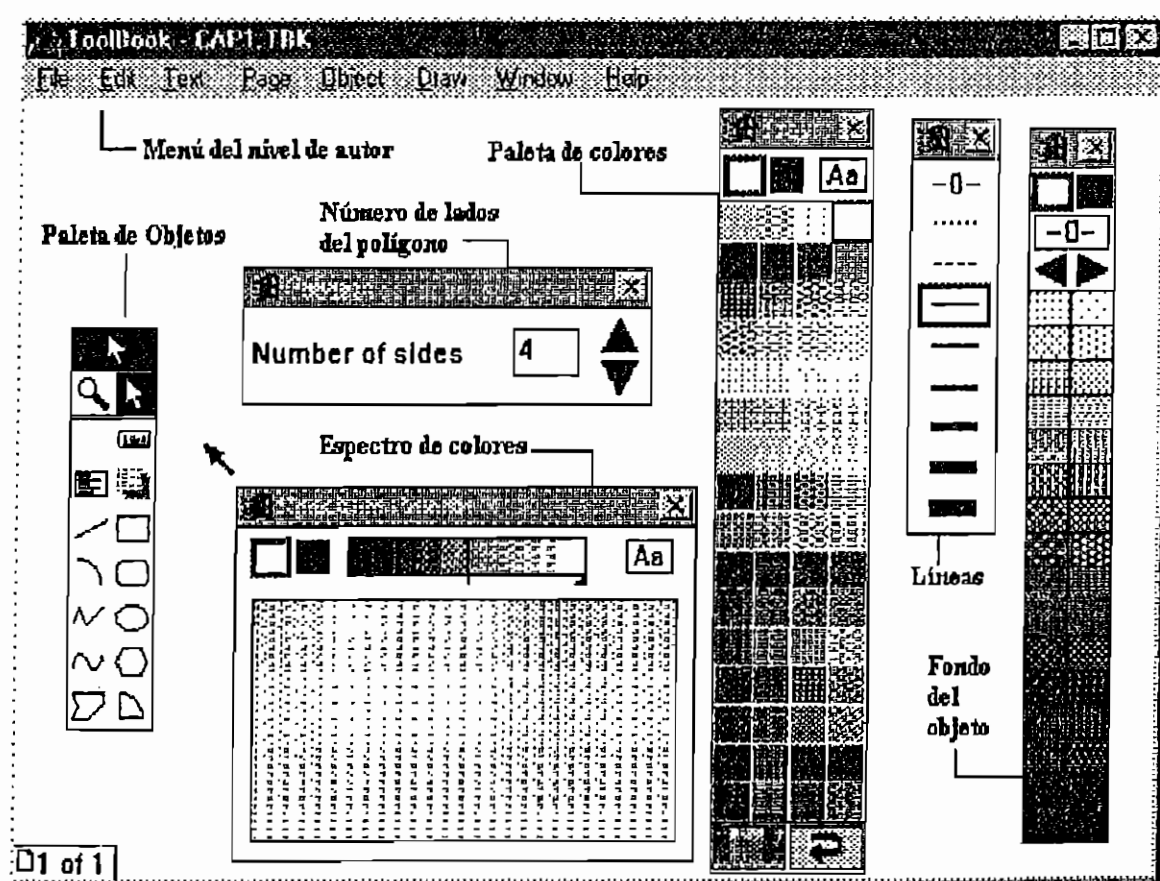


Figura 1.1 Pantalla de trabajo del programa computacional Multimedia ToolBook

### 1.1.4.1 Conceptos Básicos

En ToolBook cada aplicación está constituida por uno o más libros. Cada libro se compone de un conjunto de páginas, las páginas de un libro son almacenadas como si fueran archivos comunes de DOS. Se puede construir un libro mediante la construcción

de páginas o escribiendo los scripts correspondientes, los cuales son los portadores de las acciones que caracterizan a los libros.

Las páginas contienen campos, botones y gráficos, conocidos colectivamente como objetos. Los objetos pueden tener diferentes ubicaciones en las páginas.

En el ambiente de ToolBook se puede ser el usuario de un libro o el autor del mismo. Para poder realizar estas tareas en forma simple el paquete maneja dos niveles de trabajo: el nivel de autor (Author Level) y el nivel de lector (Reader Level), de esta forma las aplicaciones que se diseñen en el nivel de autor las puede disfrutar el nivel de lector. El nivel de lector es el nivel en el que trabajan los usuarios. El nivel de autor es el nivel de diseño de las aplicaciones (la aplicación son los módulos de teoría, diseño y simulación) mediante los comandos y atributos que maneja es posible la creación de nuevas páginas, libros o scripts.

**Objects (Objetos):** El paquete ToolBook es orientado a objetos. Los botones, campos y gráficos son objetos que se pueden crear y cada uno de ellos tienen diferentes propiedades que pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades de la persona que los creó, de tal forma de mostrar distintas apariencias y eventos para cada objeto. Los objetos son fáciles de cambiar y mover; cada objeto es independiente de otro, a menos que estén agrupados.

**Scripts (Escritos):** Cualquier objeto de una aplicación ToolBook puede tener un script. Se define como script al programa que maneja la forma de actuar de un objeto y puede ser tan simple como para cambiar una página o para mover un objeto a través de la página; o puede caracterizar acciones tan complejas como la creación de objetos o páginas, el envío de instrucciones a otros objetos o la realización de cálculos. Inclusive los textos pueden tener un script, ya que se puede crear una clase especial de objetos denominado hotword (palabra caliente), la cual provee una forma económica de conectar información relacionada que aparece en diferentes lugares. Mediante los scripts se puede dar a la aplicación la capacidad de utilizar a los hotwords en lugar de botones para enlazar páginas en el libro, y dar a la aplicación la capacidad de hipertexto. ToolBook tiene la capacidad de generar automáticamente cierto tipo de scripts, esto se da en el enlace de páginas mediante botones, en la generación de hotwords o en la grabación de una secuencia de movimientos.

**OpenScript (Escrito Abierto):** Es el lenguaje de programación de ToolBook; ofrece equivalencias para casi todas las acciones y comandos del menú; incluye funciones aritméticas y comandos de control. Además en el paquete se incluyen herramientas para la detección de errores de escritura o de lógica.

**Background (Fondo):** Background de una aplicación es aquel objeto de la aplicación que sirve como fondo para un conjunto de páginas, el background puede ser compartido por varias páginas y los objetos que contiene permanecen en la misma posición, estilo y tamaño en cada página que utiliza el mismo background.

**Foreground (Primer plano):** El foreground de una página es aquella parte de la página que retiene objetos únicos de la misma.

En la figura 1.2 podemos entender mejor algunos de los conceptos antes mencionados.

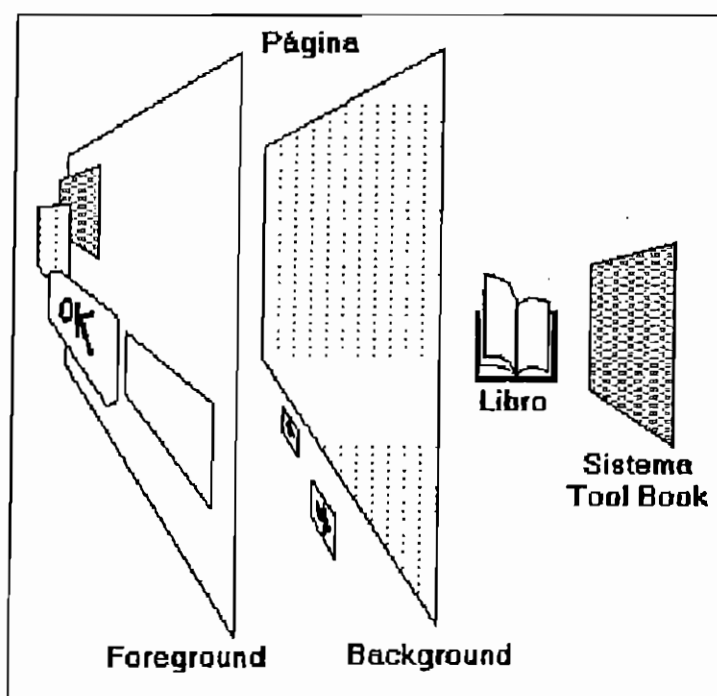


Figura 1.2 Estructura de una página de la aplicación (o libro).

**Message (Mensaje):** Las acciones que realiza un usuario provocan mensajes que deben ser enviados. Cada mensaje tiene un nombre; por ejemplo el acto de presionar un objeto con el apuntador de mouse (ratón) provoca un mensaje que puede ser enviado al objeto:



buttonUp (botón arriba). Cada mensaje puede servir para provocar diferentes eventos en el entorno de la aplicación. (ver figura 1.3)

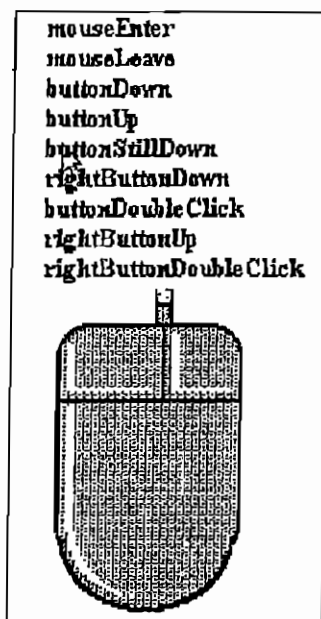


Figura 1.3 Mensajes generados por el usuario mediante el mouse.

**Handlers (Manejadores):** Cuando un objeto recibe un mensaje, lo puede responder o ignorar. Si el objeto lo ignora, el mensaje consigue pasar al grupo, página, background o libro que contiene al objeto. Para poder responder a un mensaje un objeto debe tener un handler para ese mensaje en su script.

El handler no es más que un pequeño programa en lenguaje OpenScript, que sirve para indicar las acciones que debe seguir el objeto o los objetos que sean necesarios, de tal forma de poder lograr la respuesta deseada. Consta de tres partes:

- El encabezamiento,
- La parte central y
- el final.

El encabezamiento identifica el nombre del mensaje al cual el handler deberá responder. La parte central contiene instrucciones en lenguaje OpenScript que indican que se debe hacer cuando el mensaje es recibido. El final viene dado por la instrucción end (fin) y el nombre del mensaje, sirve para indicar el final del handler. (ver figura 1.4)

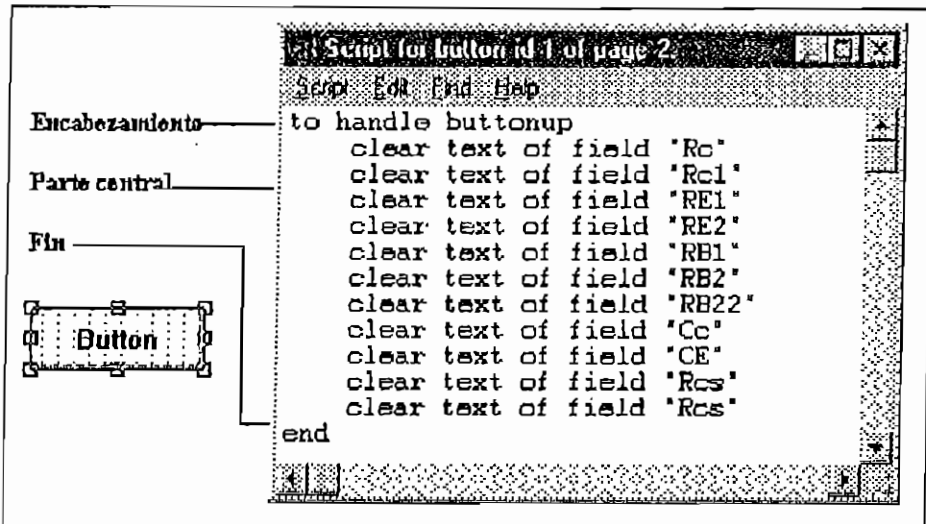


Figura 1. 4 Muestra las partes de las que consta un Handler.

**Jerarquía de los Objetos:** Cuando un mensaje es enviado a un objeto, éste viaja a través de la llamada jerarquía de objetos hasta que localiza un handler para sí mismo o hasta que retorna al sistema ToolBook.

Por ejemplo, si se hace un click sobre un objeto de una página que no tiene un manejador para el mensaje ButtonDown (botón abajo), el mensaje continúa hasta la página, luego al background y así sucesivamente hasta que retorna al sistema ToolBook; en cambio, si el script del objeto contiene un handler para el mensaje ButtonDown el handler del objeto es ejecutado y el mensaje se detiene. Si el objeto no tiene un handler pero la página lo tiene, el mensaje pasa del objeto a la página, es ejecutado y el mensaje se detiene. (ver figura 1.5)

**Menú:** Cada aplicación puede tener su propio menú, el cual es posible definirlo mediante las instrucciones menu addItem, que adicionalmente pueden trabajar tanto en el nivel de autor como en el nivel de lector, obteniendo de esta forma la personalización de cada aplicación.

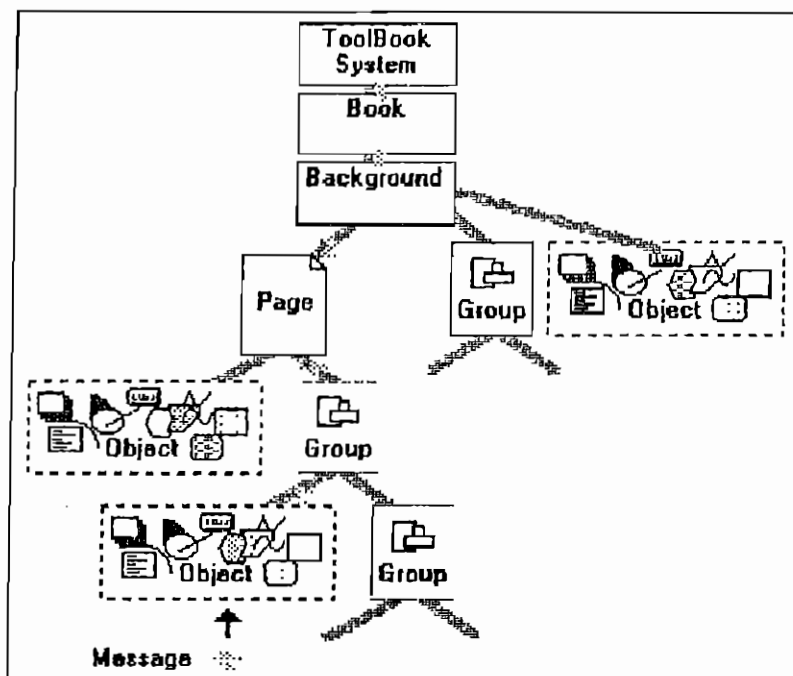


Figura 1. 5 Indica la jerarquía que tienen los objetos en un libro de ToolBook.

**Tamaño del Libro:** Esta opción es una propiedad de ToolBook que nos permite darle un tamaño a la aplicación que vamos a desarrollar, lo que nos ayuda a que cuando se ejecute el programa tengamos desde un inicio un único tamaño de la aplicación desarrollada. Con esto se logra que el estudiante pueda leer y ver el libro de Optoelectrónica en la forma más óptima.

**Passwords (Clave de acceso):** Esta caja de diálogo nos permite proteger al libro o aplicación para que nadie pueda manipularla a menos que sepa su clave de acceso. Esto nos da la ventaja de que para ampliaciones futuras de este libro sólo se necesita entrar al nivel de autor con la clave de acceso, en cambio en los archivos ejecutables es necesario tener los archivos fuentes.

## 1.2 DESARROLLO DE LA PROGRAMACION DEL MODULO TEORICO

Para el desarrollo del módulo teórico nos basamos especialmente en el principal objetivo de nuestra Tesis que es realizar un programa computacional DIDACTICO; es decir que el programa sea comprensible, visiblemente atractivo para el estudiante y

además exista una interacción continua entre el programa y el usuario para que de esta manera el estudiante se sienta atraído por trabajar con este tutorial.

Para lograr un tutorial comprensible al estudiante dividimos a los dos módulos en seis capítulos, cinco de los cuales tratarían la materia de Optoelectrónica de la manera más concisa (el sexto capítulo se referirá al módulo de Diseño y Simulación) y procurando explicar los conceptos con las ayudas que presta Multimedia ToolBook .

Ahora para que el módulo teórico sea agradable e interesante a la vista del estudiante se hizo:

- Un programa computacional que se asemeje a un libro (o cuaderno con diferentes aspectos para cada capítulo), es decir, en el que tenemos contenido, índice, páginas, número de página, capítulos, anillado, etc.
- Que cada página del libro o cuaderno equivalga a una pantalla de un computador personal, para de esta manera lograr que la información, texto y especialmente gráficos, tenga el máximo tamaño permitido por la pantalla del computador, es decir, que la información esté a la vista del estudiante.
- Backgrounds diferentes para cada capítulo, los mismos que se asemejan, en forma, a un cuaderno. De esta manera trato de lograr un ambiente de trabajo variado y familiar para el estudiante.

Y para explicar los conceptos con las ayudas de Multimedia ToolBook procuro de que:

En cada página exista:

- texto y
- un gráfico como mínimo.

En algunas páginas existirán:

- botones de ayuda,
- hipertexto,
- hipergráficos,
- ecuaciones, y
- animación.

En todas las páginas existirá la posibilidad de ir de página en página hacia adelante o hacia atrás y la posibilidad de regresar al contenido del libro llamado Optoelectrónica.

El **contenido o índice** del libro de Optoelectrónica se trata de que sea lo más completo y preciso para que el lector pueda buscar la información que requiere fácil y rápidamente; para ésto se usó algunos handlers en los scripts de los objetos denominados campos (que se verán más adelante).

En la figura 1.6 podemos ver el modelo del **contenido** del libro.

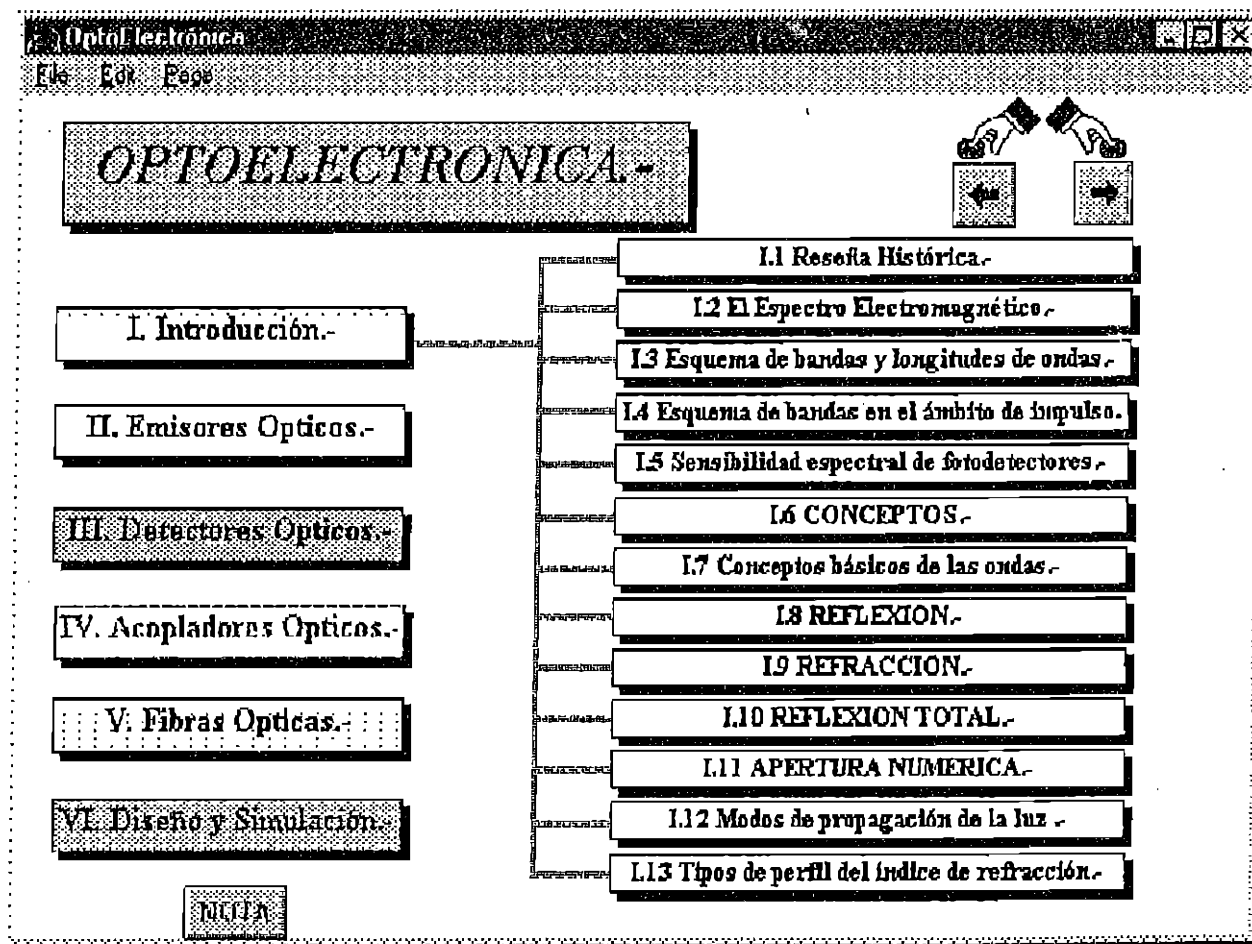


Figura 1. 6 Pantalla del contenido de la aplicación desarrollada.

En la figura 1.7 podemos ver el modelo de la página de algún capítulo.

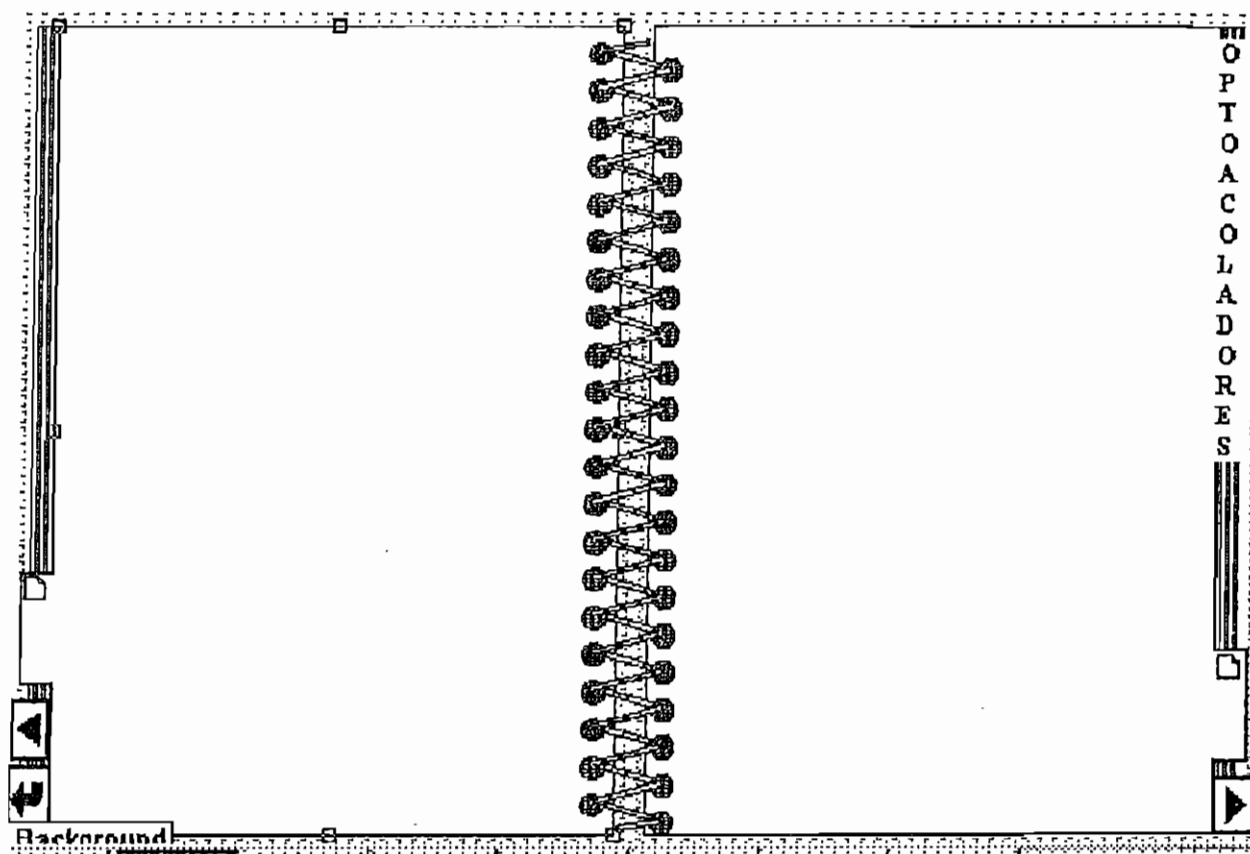


Figura 1. 7 Uno de los Backgrounds usados en el programa.

A continuación detallaremos las herramientas que se usaron para crear el módulo teórico.

### 1.2.1 Inserción de Texto en cada Página

Para la inclusión de texto en cada página se usa el objeto denominado CAMPO (Field). Los campos son objetos que proveen áreas definidas en una página donde tu puedes leer, escribir y dar formato a un texto. El texto es una propiedad de un campo. Un campo puede ser tan largo como el tamaño máximo de una página y tan pequeño como dos pixeles<sup>\*</sup>, y tu puedes ingresar hasta 32000 caracteres en éste. Para ingresar texto en un campo hacemos doble click (golpecito) en el interior del mismo con el indicador del mouse.

<sup>\*</sup> El pixel es un punto de luz que se prende o se apaga conforme se da una señal.

### 1.2.2 Creación de Botones con Texto de Ayuda

Los botones (buttons) son objetos que tienen la forma de un botón al cual se le pueden dar estilos diferentes a su borde. Para lograr que estos botones tengan texto de ayuda es necesario usar el manejador (handler) denominado **REQUEST** (solicitar) para que responda al mensaje que especifiquemos. De esta manera el texto de ayuda lo incluiremos dentro de este manejador. (ver figura 1.8)

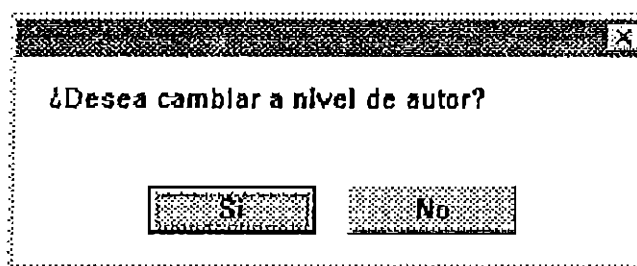


Figura 1. 8 Pantalla usada para texto de ayuda.

### 1.2.3 Creación de Botones como Controles de Navegación

Una importante y frecuente función usada para los botones es la navegación entre páginas y libros.

Para poder usar los botones como controles de navegación tenemos que usar el handler adecuado para la navegación entre páginas que es el denominado **GO TO PAGE** (Ir a la página); el mismo que responderá al mensaje especificado por nosotros; es decir el evento responderá al mensaje especificado.

Es una buena idea usar un botón como enlace entre páginas ya que el estudiante se encuentra familiarizado con la idea de que algo va a suceder al realizar un click o doble click sobre el botón.

Además a estos botones de navegación les podemos dar la forma que deseamos usando el editor de gráficos y la ayuda de los efectos visuales que nos permite el Multimedia ToolBook. (ver figura 1.9)

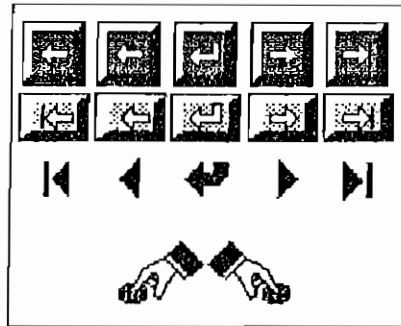


Figura 1.9 Diferentes formas de los botones para navegación.

#### 1.2.4 Inclusión de Hotwords

Los hotwords son una clase especial de objetos, más específicamente son una clase especial de texto que tienen un script específico.

Los hotwords son creados, así como todos los objetos, en el nivel de autor. Un hotword puede estar hecho de unos pocos caracteres, una palabra, una oración, un párrafo, o todo el texto en un campo. Dos o más hotwords pueden aparecer en una misma oración, pero dos hotwords no pueden superponerse.

Los hotwords se pueden mostrar o no, en nuestro trabajo lo haremos para que el lector los pueda diferenciar a simple vista. Además cuando el indicador del mouse atraviesa un hotword, éste cambia de forma a un rectángulo.

##### 1.2.4.1 Principales Aplicaciones de los Hotwords

A los hotwords se les puede dar diferentes aplicaciones dependiendo del manejador que tenga el script de cada hotword.

Así las principales aplicaciones de los hotwords son:

- Como hipertexto,
- Como hipergráfico, y
- Como enlace de páginas de un libro. (ver figura 1.10)



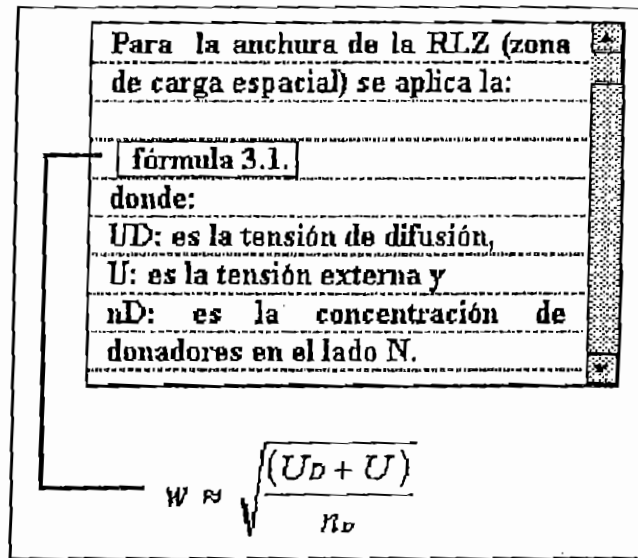


Figura 1. 10 Recuadro que aparece en la palabras denominadas Hotwords.

### 1.2.5 Inclusión de Gráficos

Se puede copiar una imagen gráfica dentro del Clipboard (Tablero de corte) desde una aplicación de Windows, se puede probablemente pegar ésta dentro de ToolBook. Si se puede grabar un archivo gráfico en varios formatos comunes, se podrá probablemente importar estos gráficos para crear una pintura (paint) o un cuadro (picture). Dependiendo de como se cree la imagen gráfica, se puede usar tres tipos de objetos gráficos en ToolBook:

- Un **draw object** (objeto de dibujo) es una forma gráfica creada con una de las herramientas de dibujo que proporciona el paquete ToolBook.
- Un **picture** (cuadro) es almacenado como un archivo metafile (archivo meta) de Windows y es creado importando o pegando un gráfico de dibujo desde otra aplicación.
- Un **paint object** (objeto de pintura) es almacenado como un archivo de mapa de pixels que hacen la imagen, y es creada pegando o importando un archivo bitmap (mapa de bits) desde otra aplicación.

A los **objetos de dibujo** se les puede mover o variar su tamaño, y además se pueden cambiar ciertas características de los mismos como son: estilo de la línea y color.

A los cuadros y objetos de pintura podemos moverlos, pero sólo se puede variar el tamaño de los cuadros. Además a los objetos de pintura sólo se les puede variar el tamaño de su borde, no el tamaño de la imagen. Además los cuadros y objetos de pintura no pueden ser editados en el ambiente de ToolBook, sea que se importen o se peguen desde otra aplicación.

Cuando se usa la paleta de ToolBook para dibujar un gráfico, entonces se crea un objeto de dibujo.

#### **1.2.5.1 Pegando Gráficos desde otros Programas de Windows**

ToolBook puede crear un cuadro desde algún gráfico que aparezca en el ClipBoard de Windows en formato de "Cuadro (Picture)". Algunos ejemplos incluyen gráficos dibujados desde Micrografx Draw y Designer, Microsoft Power Point y Corel Draw.

ToolBook puede crear un objeto de pintura desde algún gráfico que aparezca en el ClipBoard de Windows en un formato de "Bitmap" o "DIB Bitmap". Algunos ejemplos incluyen imágenes escaneadas, gráficos pintados desde Aldus PageMaker, gráficos desde PC Paintbrush, y símbolos desde Micrografx Designer.

#### **1.2.5.2 Importando Gráficos**

Se puede importar gráficos directamente dentro de ToolBook sin correr la aplicación fuente o usando el ClipBoard. Se puede también importar gráficos, no desde aplicaciones de Windows.

Cuando se importa un gráfico, ToolBook primero corre un programa llamado **import filter** (importe de filtros) para convertir los archivos gráficos a un bitmap o metafile Windows. Entonces ToolBook crea un cuadro o un objeto de pintura.

#### **1.2.5.3 Tipos de Gráficos soportados por ToolBook**

Se puede pegar o importar gráficos desde otra aplicación que tenga archivos almacenados con algunos de los formatos existentes en el mercado. (ver tabla 1.1).

EXTENSIÓN DEL ARCHIVO	FUENTE DEL FORMATO DEL ARCHIVO	TIPO DE OBJETO EN TOOLBOOK
.BMP	Bitmap	Objeto de pintura
.DIB	Device Independent Bitmap	Objeto de pintura
.CGM	Computer Graphics Metafile	Cuadro
.DRW	Micrografx Draw	Cuadro
.EPS	Encapsulated PostScript	Cuadro
.TIF	Tagged Image File Format	Cuadro
.WMF	Windows Metafile	Cuadro

Tabla 1.1 Formatos de gráficos manejados por ToolBook

#### 1.2.5.4 Inclusión de Ecuaciones

Para la inclusión de ecuaciones en nuestro libro estas se deben crear primeramente en un editor de ecuaciones cualquiera (por ejemplo Microsoft Equations de WORD) para luego copiarlas y pegarlas en nuestra aplicación ToolBook; teniendo en cuenta que en el ambiente ToolBook la ecuación no se considerará como texto sino como un objeto gráfico, específicamente como un cuadro.

#### 1.2.6 Animación, Audio y Video

Se puede definir a la animación como el entorno de gráficos tanto estáticos como en movimiento que deben ser incluidos en la aplicación. En cambio el audio y video\* pueden ser todos aquellos archivos con cierto formato de grabación que puede estar incluido dentro de la aplicación o bien que la aplicación reconozca al dispositivo de CD para que posibilite el escuchar música convencional o ver el video desde una cámara normal.

En este punto es necesario aclarar que solamente se van a describir los métodos mediante los cuales Multimedia ToolBook permite agregar animación, audio y video a sus

\* La integración de audio y video no se realiza en esta aplicación debido principalmente al computador disponible ya que su actualización demanda un fuerte egreso económico; dejando su integración para ampliaciones futuras de la aplicación.

aplicaciones, debido a que cada paquete comercial puede tener sus diferentes formas de inclusión, pero siempre basadas en la facilidad que preste el ambiente Windows.

### 1.2.6.1 Integración de Animación

Como ya hemos visto anteriormente con las herramientas provistas por ToolBook se puede crear y cambiar gráficos desde una simple línea a imágenes detalladas. Además permite crear scripts para cualquier gráfico tal como se puede hacer con cualquier otro tipo de objeto.

Cuando estos gráficos han sido introducidos en la ventana de diseño, es posible que se tenga la necesidad de mostrar algunos detalles adicionales, una de las formas de lograrlo es adicionar movimiento al objeto, es decir animarlo.

Existen diferentes tipos de animación, pero los podemos dividir en dos grupos: los tipos lineales y los tipos no lineales. Los tipos lineales se utilizan en aquellos casos en los que un objeto va a moverse de un sitio a otro, sin cambiar de forma o posición. En cambio los tipos no lineales se los utiliza cuando se quiere mostrar una secuencia de hechos que le pueden suceder a un mismo objeto, pero que hará que el gráfico varía de forma o posición.

**Tipos Lineales de Animación:** El método que ToolBook utiliza para lograr una animación de tipo lineal se basa en la realización de un script en el que se vaya posicionando al objeto exactamente en el lugar en el que se desea o mediante la grabación de la secuencia del objeto.

**Tipos No Lineales de Animación:** Los tipos no lineales de animación son muy útiles cuando se quiere mostrar una secuencia de movimientos que afecten la posición, tamaño y/o forma del objeto.

Dentro de los tipos no lineales de animación están los métodos de la pila de objetos, de la localización específica de bordes, vértices o ángulos de figuras geométricas (que suele ser muy útil en la presentación de diagramas tipo barras o pasteles) y adicionalmente se encuentra el método de movimiento de páginas, que puede ser tomado como un método mixto.

El método de la pila de objetos se lo utiliza principalmente para animar imágenes que tienen la misma forma y tamaño, ToolBook permite utilizarlo de tres formas distintas, ha saber:

- Showing & hiding (método de mostrar y esconder).
- Layering (método de utilización de diferentes capas).
- Moving off/on page (método del desplazamiento del objeto dentro y fuera de la página).

Con el método de la localización específica de bordes, ángulos o vértices de figuras geométricas podemos lograr efectos de crecimiento o decrecimiento de las figuras, de tal forma de mostrar las variaciones que sufrirán las curvas o gráficos que relaciones dos o más variables, cuando una de ellas cambia, esto se logra mediante la utilización de scripts que indiquen con precisión cuales deben ser las nuevas posiciones de las líneas, barras o segmentos de un pastel.

El método "flipping pages" (movimiento de páginas), mediante el cual se realiza una serie de dibujos del objeto en diferentes posiciones, de tal forma que al ir volteando las páginas en las que se encuentran los gráficos se da la sensación de movimiento. Este método se lo utiliza cuando se necesita una animación tipo caricatura. Es catalogado como mixto porque puede trabajarse tanto en forma lineal, como en forma no lineal.

### 1.2.6.2 Integración de Audio

Quizá una de las maneras de hacer más atractivo un programa es mediante la utilización de efectos de que alguna manera capten la atención del usuario, uno de ellos es la animación, y el otro es el audio. Al lograr integrar audio en una aplicación, ya sea explicativo o de fondo (tipo música ambiental), se logra que resulte más amena y entretenida al usuario.

En la actualidad la gran mayoría de las personas tienen una ligera idea de como se realiza el proceso de producción de audio, pero ahora se tratará de indicar cuáles son los aspectos que ToolBook maneja para poder trabajar con este medio.

En primer lugar, dentro de los requerimientos de hardware necesarios para el computador de la persona que esté desarrollando la aplicación es indispensable que

disponga de las facilidades de una tarjeta de sonido con micrófono y adicionalmente podría requerir de un drive tipo CD, de tal forma de poder acceder a los procesos de grabación, edición, pruebas y puesta en funcionamiento de las aplicaciones que contengan archivos con audio. El paquete utiliza cierto tipo de comandos que permiten que las grabaciones realizadas en formato WAV puedan ser escuchadas con posterioridad y en el momento en que sea necesario. En lo que a requerimientos de software se refiere, obviamente es indispensable disponer de un paquete que permita manejar archivos que se encuentran en formato de audio (.VOX, .WAV, etc.); cabe indicar que el formato con el que trabaja Asymetrix ToolBook es el de archivos con extensión .WAV.

Este tipo de archivos son el resultado de una conversión analógica a digital (C.A.D.), de una manera similar a la utilizada en los procesos iniciales de grabación de los CD's convencionales, con la diferencia que los CD's usan 14 bits de muestreo a 44 KHz, en cambio en los archivos de computadora se utilizan 4 bits de muestreo a frecuencias que pueden oscilar entre los 11 y los 22 KHz, de esta forma se tienen archivos de sonidos de poca calidad, pero que ocupan menor espacio de almacenamiento.

Existen comandos\* específicos dentro del lenguaje OpenScript que permiten a la persona que está realizando una aplicación tener el control suficiente sobre esta clase de archivos y sobre los dispositivos que se utilizan para su reproducción, de tal forma que puedan ser debidamente aprovechados. Con estos comandos y con instrucciones específicas se lograrán manejar eventos tales como la apertura de puertos (habilitación) y su posterior cierre, lectura de archivos, acciones de arranque y pausa, etc.; de tal forma de realizar instrucciones de la voz del instructor previamente digitalizada.

### 1.2.6.2 Integración de Video

No se hablará detalladamente de la integración de video, ya que, en ToolBook la utilización de video es muy similar a la de audio.

Los archivos que maneja son análogos a los de audio pero con la extensión \*.MOV, los cuales en realidad son video digitalizado, pero lograr el video digitalizado es el problema, debido a que previamente se necesita la grabación del video, luego de tener la

---

\* La palabra comando es equivalente a un handler.

cámara es necesario pasar por el proceso de conversión A/D (analógico a digital) mediante hardware y software específico de cada fabricante.

### 1.2.7 Manejo de los Objetos en Pantalla

OpenScript tiene varios comandos para dibujar objetos, así como también para manipularlos de varias maneras (dibujarlos, mostrarlos, esconderlos, moverlos, etc.). Adicionalmente los objetos pueden ser dibujados y manejados directamente por quien esté desarrollando la aplicación, sin embargo, puede quedar la opción de que el usuario vea como se dibujan y se animan automáticamente en la pantalla, y es aquí donde se utilizan los comandos. (ver tabla 1.2)

COMANDO	FUNCION
DRAW	DIBUJA
SHOW	MUESTRA
HIDE	ESCONDE
MOVE	MUEVE
SET POSITION	COLOCA EN UNA POSICION

Tabla 1.2 Comandos usados para el manejo de objetos.

Mediante la utilización de estos comandos los objetos pueden ser modificados de acuerdo con las necesidades de quien desarrolla la aplicación.

### 1.2.8 Controles de Efectos Visuales

OpenScript permite fácilmente la utilización de comandos que sirven para la visualización de efectos especiales cuando se desea cambiar de páginas en un mismo libro.

Para el uso de los efectos visuales el OpenScript trabaja con comandos tales como: **fxDissolve** (Desvanecer), **fxZoom** (Subir de pronto), y **fxWipe** (Limpiar), cuya sintaxis es muy simple.

### 1.3 DESARROLLO DE LA PROGRAMACION DEL MODULO DE DISEÑO Y SIMULACION

Para el desarrollo del módulo de diseño y simulación nos basamos en el objetivo de nuestra Tesis que es realizar un programa computacional que diseñe y simule circuitos básicos para el mejor entendimiento del módulo teórico. Para lograr esto se hizo:

- Que los datos de entrada, resultados y las gráficas de simulación estuvieran en una misma pantalla (en este caso página del libro) del computador, tratando de que el estudiante observara las variaciones de los resultados, en forma numérica y gráfica a simple vista, en función de la variación de los datos de entrada.
- Además usamos las facilidades de hipertexto e hipergráfico del programa para mostrar el diseño y el circuito implementado.

A continuación hablaremos de las herramientas usadas para el desarrollo del módulo de Diseño y Simulación; y como en este módulo lo que hacemos es más una programación secuencial para la realización de cálculo y gráficas de funciones, entonces nos referiremos más a los elementos del OpenScript que permitieron el desarrollo de este módulo.

#### 1.3.1 Preguntas y Requerimientos

Para el ingreso de datos se usan los comandos de preguntas y requerimientos que es muy usado para conseguir la información que quiere ingresar el estudiante. Estos comandos se usan para pedir al usuario el ingreso de algún dato, que en este caso por lo general será un texto ó un número. En general cualquier texto que el usuario ingrese queda almacenado en la variable especial "it".

Los comandos de requerimientos despliegan un mensaje en pantalla y esperan recibir del usuario un "click" en uno de los botones de respuesta. El texto del botón que ha sido digitado es colocado por default (por falla) en la variable especial "it".

En el trabajo por lo general usamos el comando ASK (preguntar), además de otros comandos que en algunas ocasiones limitaban el número de datos de ingreso así como el campo de números posibles a ingresar. (ver figura 1.11)



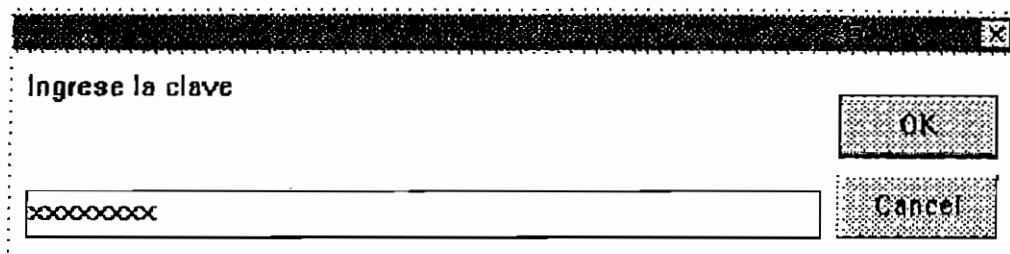


Figura 1. 11 Pantalla usada para el ingreso de datos.

### 1.3.2 Identificadores de Objetos

Para realizar el diseño debemos tomar los datos ingresados por los estudiantes en los diferentes campos de texto, y para ésto debemos identificar el objeto que tiene la información; es así, que cuando se escribe un script, éste siempre se refiere a un objeto de una página. Para referirse al objeto se usa una combinación del tipo de objeto (field, button, etc.) y del nombre del objeto o ID (Identificador) , si el objeto no se encuentra en la página en cuestión se debe añadir también la información del número o nombre de la página en la que se encuentra el objeto.

Se puede referir a un objeto usando su nombre, si es que lo tiene, o su ID. Para colocar un nombre específico a un objeto se utiliza la ventana de propiedades y colocando el nombre que se le desee dar; sin embargo el ID del objeto es asignado por ToolBook y es único para cada uno de los objetos que se encuentren dentro del libro, siendo ésta la forma más usual para referirse a un objeto.

### 1.3.3 Contenedores

Para realizar los cálculos del diseño del circuito Optoelectrónico necesitamos variables del OpenScript que puedan almacenar un valor. Es así que en OpenScript existen contenedores que pueden retener un valor, a los cuales se les denomina variables.

Existen dos clases principales de variables que son: las variables locales y las variables del sistema, de las cuales la más importante es la variable especial "it". Las variables del sistema retienen la información a pesar de que el handler ya haya finalizado y pueden ser compartidas por distintos handlers. En cambio las variables locales son descartadas en cuanto finaliza el handler.

La variable especial "it" es usada como el contenedor predeterminado, aún cuando se utilicen comandos específicos; OpenScript coloca el resultado de determinada operación en ella; de la misma forma ocurre cuando se trabajan con comandos de preguntas y respuestas.

#### 1.3.4 Listas

Una lista contienen items separados por comas, por ejemplo la siguiente lista contiene cuatro items: "x1,x2,x3,x4". Es de notar que aún cuando x3 tiene dos caracteres, éste constituye un item de la lista. Los caracteres pueden ser alfanuméricos.

Así para la simulación de un circuito necesitamos graficar ciertos objetos, para lo cual requerimos de la posición del objeto en la pantalla que viene dada por una lista de dos items, que representan las coordenadas X e Y del objeto con relación a la esquina superior izquierda de la ventana de aplicación, si adicionalmente se quiere variar o indicar el tamaño del mismo basta con adicionar dos items más a la lista que representan las coordenadas de la esquina inferior derecha del objeto. Cada uno de los elementos de una lista puede ser manipulado independientemente por la persona que se encuentra realizando la aplicación.

#### 1.3.5 Expresiones

En el entorno de OpenScript una expresión es una forma de combinar o especificar valores, por ejemplo:

- a) 125+25
- b) text of field "Vcc" (texto del campo "Vcc")

Cada expresión tiene un resultado. El resultado de la primera expresión es 150, en cambio el resultado de la segunda expresión depende del contenido de un campo llamado "Vcc".

OpenScript maneja tres tipos de expresiones:

- Numéricas: dan como resultado un número,

- String: dan como resultado una cadena de caracteres, y
- Lógicas: dan como resultado verdadero o falso.

### 1.3.6 Estructuras de Control

OpenScript contiene algunas estructuras de control, tanto para bifurcaciones como para lazos.

Para bifurcaciones utiliza dos tipos de estructuras de control: `if/then/else` (si/entonces/caso contrario) y `conditions/when/else` (condiciones/cuando/caso contrario). Las estructuras para lazos que maneja OpenScript son: `do/until` (haga/hasta) y `while` (mientras).

### 1.3.7 Mensajes definidos por el usuario

Para realizar una especie de subprogramas que eviten el repetir continuamente cierto tipo de instrucciones, es posible definir Mensajes personalizados de tal forma de lograr que se realice un mismo cálculo o acción de un objeto las veces que se quieran con sólo usar una línea de instrucción y con el comando **SEND** (enviar).

### 1.3.8 Funciones definidas por el usuario

En caso de que sea necesario definir funciones (lógicas o matemáticas) compuestas, las mismas que no se encuentren definidas por el lenguaje es posible trabajar de la forma en la que se procedió a la definición de mensajes personalizados y lograr que se realicen ciertas funciones repetitivas de cálculo y lógica.

## 1.4 MANUAL DE USUARIO

### 1.4.1 Requerimientos de Hardware y Software para la Ejecución del Programa

Los requerimientos mínimos de Hardware para la instalación del programa desarrollado son:

- Computador 386 DX,

- Memoria RAM de 4 MB,
- Espacio libre en disco duro de 5 MB,
- Un drive de 3½,
- Monitor a color, y
- Tarjeta de video VGA (como mínimo).

Los requerimientos de Software para la instalación del programa son:

- Cualquier sistema operativo.

Además necesitamos crear un directorio en el cual copiaremos los siguientes archivos (además del programa desarrollado):

- Tbk\*.dll,
- Tbook.exe,
- Tbknet.exe,
- Tbkmm,
- Tbkmmwid,
- Tbkmm.sbk,
- RunTime, y
- Ync.

También en el archivo autoexec.bat podríamos colocar el Path (Ruta) de nuestro programa.

Para la ejecución del programa realizamos el siguientes procedimiento:

- Encendemos el computador.
- Corremos el archivo Tbook.exe.
- Luego vamos al menú. (ver figura 1.12)
- Elegimos del menú la opción de abrir (Open).
- Por último elegimos el archivo a abrir o colocamos el Path de nuestro archivo de trabajo y su nombre (OPTO.TBK).

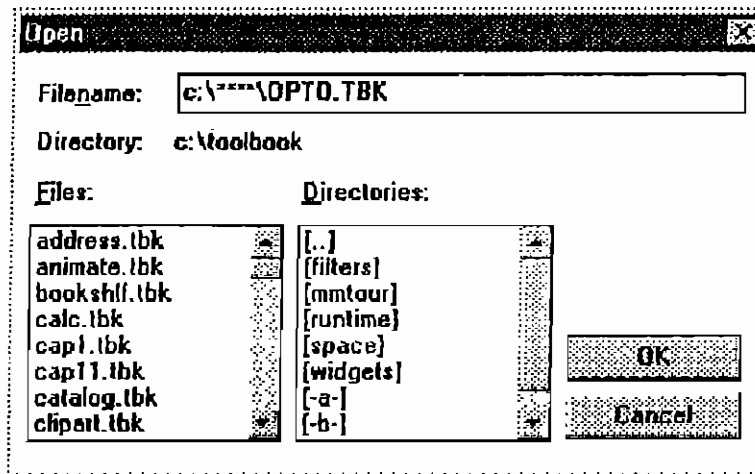


Figura 1. 12 Pantalla que aparece cuando vamos a abrir la aplicación.

Si Windows o ToolBook no empieza siguiendo los pasos descritos anteriormente, entonces es necesario chequear el estado del Path en el archivo autoexec.bat.

Si sigue sin correr el programa entonces es mejor instalar el paquete completo de ToolBook (que no lleva más de 10 minutos).

Se puede empezar y salir del programa igual que cualquier otra aplicación de Windows; pudiendo abrir ToolBook en general o específicamente el programa desarrollado.

Se puede empezar directamente la aplicación desarrollada escribiendo en el PROMPT (Apuntador) del DOS el PATH completo del archivo de trabajo; o haciendo double-click en el icono de la aplicación desarrollada.

#### 1.4.2 Manual General del Programa (de los dos Módulos)

Como nuestro programa está realizado en un sólo ambiente para los dos módulos (Módulo Teórico y Módulo de Diseño y Simulación), entonces éstos tendrán un solo menú, el cual se usará como cualquier otro menú de los programas que trabajan bajo un ambiente Windows.

Para nuestro programa tendremos las siguientes opciones de menú: (en cada una de las opciones de menú tendremos un submenú)

- File (Archivo)
  - Open (Abrir)
  - Save As (grabar como)
  - Printer Setup (setear la impresora)
  - Printer pages (imprimir páginas)
  - Exit (salir)
- Edit (Editor)
  - Author (nivel de autor)
- Page (Página)
  - Next (siguiente)
  - Previous (anterior)
  - First (primera)
  - Last (última)
  - Back (regresar)
  - Search (Buscar)

Las opciones anteriormente descritas son las que frecuentemente se usan en cualquier aplicación de Windows y por ende su uso es fácil de aprender.

La opción de **SEARCH** (buscar) necesita una explicación adicional ya que es una opción no muy frecuente.

**SEARCH:** Esta opción se refiere a la capacidad que tenemos de buscar texto en nuestra aplicación. Es así que los usuarios pueden usar **SEARCH** para buscar:

- Texto en campos mostrados en una sola página.
- Texto en todos los campos mostrados en el libro.

Una vez que encuentra el texto buscado nos lleva a la página en la que se encuentra; hay que tomar en cuenta que no encuentra texto oculto.

La opción de **SEARCH** tiene algunas propiedades que son fáciles de manejar y comprender. En general esta opción es una especie de índice alfabético. (ver figura 1.13)

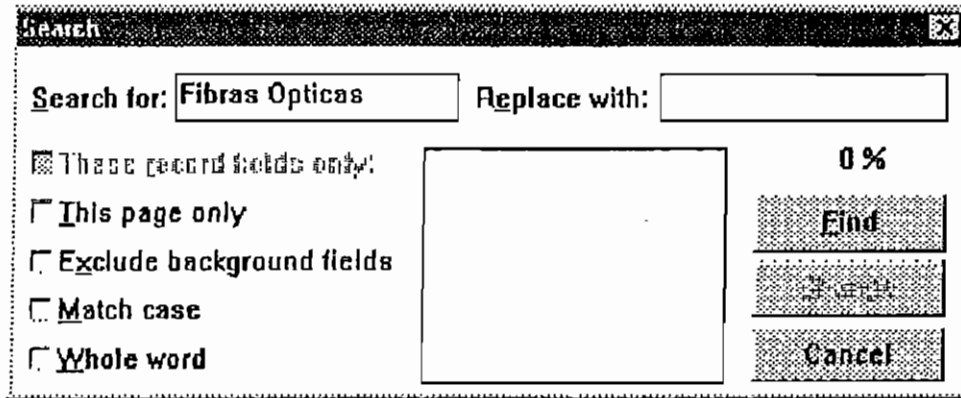


Figura 1. 13 Pantalla de búsqueda de palabras (caracteres).

Además sabemos que el estudiante trabajará en el nivel de lector ; en este nivel se pueden pasar las páginas del libro mediante los objetos controladores que se tiene en cada página y que claramente indican hacia donde se podrá mover el estudiante entre las páginas del libro de Optoelectrónica (estos objetos sólo están en el Módulo Teórico). Además de los objetos de navegación de cada página, existe la posibilidad de navegación en el libro a través de la opción de PAGE del menú antes indicado; el cual también nos permite algunas otras posibilidades más. En esta forma de cambio de página existe para los dos módulos.

El manejo del programa en realidad es muy sencillo, ya que en cada página del mismo se ve y se explica muy claramente las facilidades que presta el programa al usuario.

Como por ejemplo en los objetos que sean botones por lógica se deberá hacer un click sobre éste para observar que sucede.

Para que las animaciones de algún gráfico comiencen así mismo se deberá hacer un click sobre el botón que se relacione a esa animación.

Así mismo para esconder o mostrar ciertos campos de texto o ciertos gráficos se deberá leer lo que ejecuta a ese manejador, así por ejemplo habrá ciertas ecuaciones o gráficos que se esconderán haciendo un doble click o haciendo un click con el botón derecho del mouse, etc.

O también existirán ocasiones en que la forma del mouse varfe cuando sobreponemos el puntero del mismo sobre algún objeto, lo que al estudiante por simple iniciativa le

llevará a tratar de encontrar que sucede con ese objeto al realizar alguna acción con el mouse.

Se sugiere que cuando existan botones denominados con la etiqueta Nota es conveniente leer la misma ya que de alguna manera nos va ayudar al manejo del programa.

### 1.4.3 Características del Módulo de Diseño y Simulación

En este módulo hay que tomar en cuenta ciertas características que tiene el mismo; así tenemos:

- Las unidades de los datos de entrada colocadas en cada diseño son las más comunes para los elementos usados en cada circuito. Por lo tanto el ingreso de esos datos se hará en base a esas unidades; pero pudiendo ingresar cualquier valor con la función exponencial que sea.
- Las unidades de los resultados están en función así mismo de las unidades de los datos de entrada.
- En cada diseño existe un campo para los datos de entrada, un campo para los datos del elemento, un campo para los resultados, un campo con el circuito diseñado, un campo de los pasos para el diseño y un campo para la simulación.
- Para el cálculo de valores estándar de resistencias y capacitores trabajé con una tolerancia del  $\pm 10\%$ ; por ser las más comunes en el mercado.

Para la ejecución del diseño y simulación de cada circuito es conveniente seguir los siguientes pasos:

- Primero presionar el botón de reset (resetear) del campo de resultados y del campo de simulación si es que lo tuviese.
- Luego ingresar los datos del circuito a diseñar, sugiriéndose que sean datos reales por que o sino se obtendrán resultados sin sentido.
- De allí presionar el botón de cálculo y ver los resultados numéricos.
- En algunas ocasiones será necesario ingresar los datos que caracterizan a un elemento específico y al circuito a implementar (para realizar la simulación).



- Entonces presionamos el botón de simulación\* y observamos lo que sucede.

En caso de querer variar algún dato para observar la variación de los resultados se recomienda siempre primero resetear el campo de simulación y el campo de resultados; para luego empezar con el procedimiento antes mencionado.

Si se desea ver a que se refiere cada dato de la pantalla de diseño, basta con hacer un click sobre el dato ó el símbolo del dato a ingresar. (ver figura 1.14)

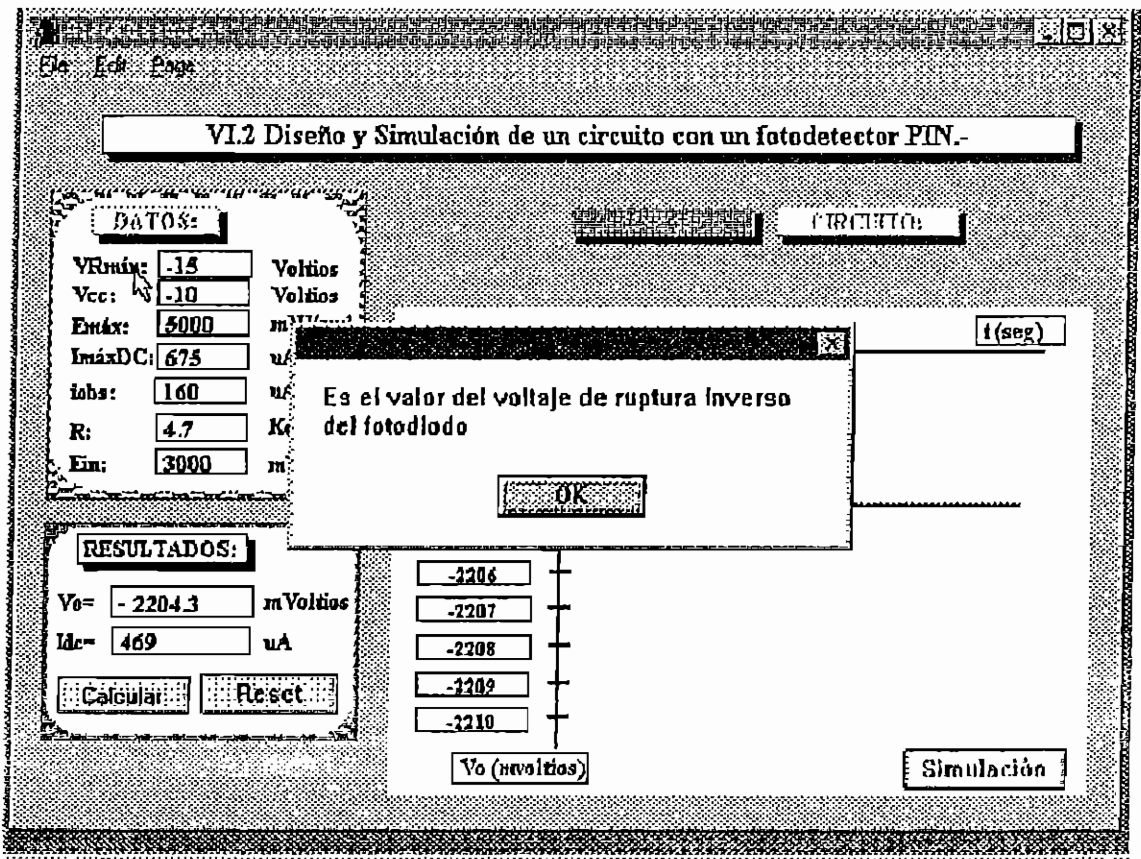


Figura 1. 14 Indica los textos de ayuda para los datos del módulo de Diseño y Simulación

Además si queremos ver los pasos del diseño ó el circuito diseñado, sólo hacemos un click sobre los campos que tienen las palabra **diseño** y **circuito**, respectivamente. (ver figura 1.15)

\* En el anexo 1 tenemos las muestras gráficas de todas las pantallas del módulo de diseño y simulación.

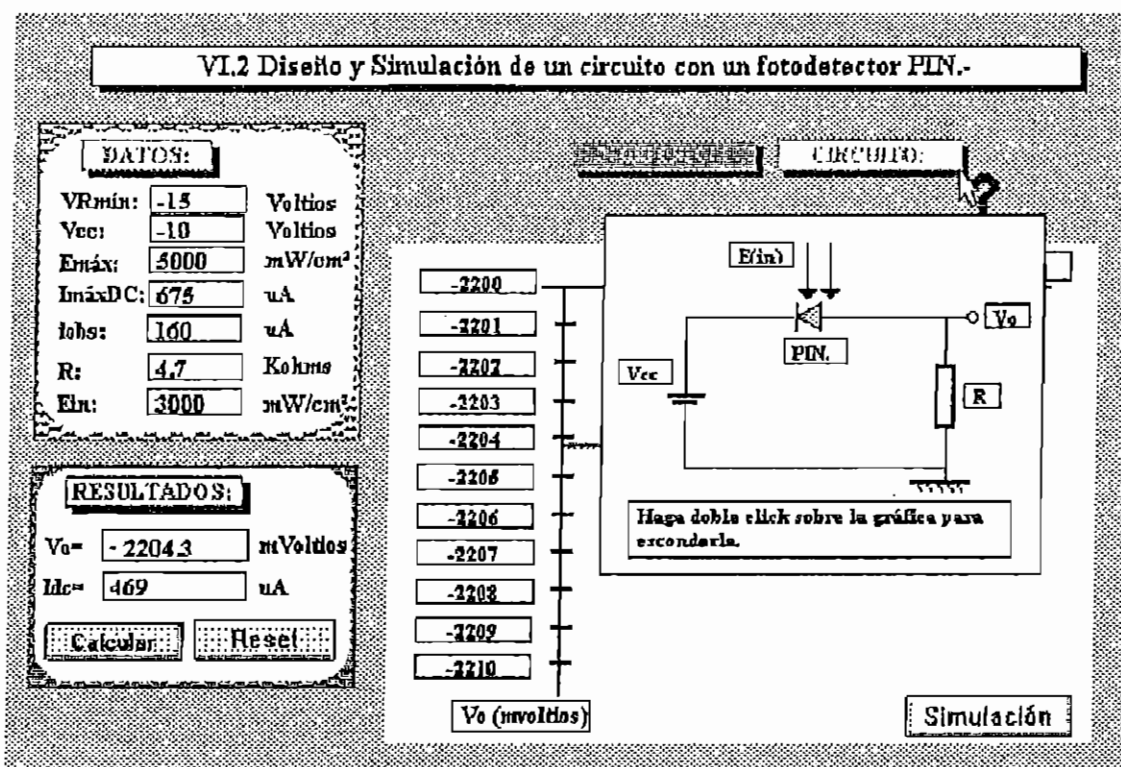


Figura 1. 15 Indica como se muestra el hipertexto en el módulo de Diseño y Simulación

La simulación de los diferentes circuitos se la ha implementado de manera que se vea de una forma didáctica la utilización que tienen los diferentes elementos optoelectrónicos. Es decir, para que se observe como la luz emitida ó la luz incidente (según sea el elemento usado) interviene y afecta en los diferentes circuitos diseñados.

A continuación hablaremos del manejo de la simulación de algunos circuitos, los mismos que merecen una explicación adicional a los demás.

Para la simulación de los circuitos con fototransistores que trabajan como compuertas lógicas, primero deberemos ingresar la secuencia de incidencia de luz para cada fototransistor (ver cuadros del anexo 1), con un máximo de diez dígitos, el valor uno (1) representará que está incidiendo luz; el valor cero (0) equivaldrá a que no existe incidencia de luz.

En la simulación de un circuito con fototransistor en emisor común tenemos dos opciones.

La primera que hace el diseño y simulación de los datos ingresados para este circuito automáticamente.

Y la segunda opción, en la que tenemos la posibilidad de comparar entre los valores de resistencia calculados directamente y valores de resistencia que ingresamos una vez observados los resultados anteriores. Es por eso que en esta opción de diseño existen dos botones, uno de CALCULO que se refiere al cálculo de las resistencias con los datos de entrada y el otro de RECALCULO que se refiere al recálculo de los voltajes de salida según las variaciones hechas en las resistencias calculadas al inicio.

Por último hay que aclarar que no se hizo la simulación para el circuito acoplador de familias digitales, ya que la misma no aportaría en nada al mayor entendimiento de la materia. Su principal didáctica está en la forma de diseño.

**Nota:**

Para una mejor comprensión del manejo del programa desarrollado, tanto del módulo de Teoría como del módulo de Diseño y Simulación, se recomienda practicar en el mismo tomando en cuenta los criterios expuestos en este capítulo.

## **CAPITULO II**

### **MODULO TEORICO. CONCEPTOS, PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS OPTOELECTRONICOS USADOS EN EL PROGRAMA.**

#### **2.1 CONCEPTOS**

##### **2.1.1 El Espectro Electromagnético**

Desde hace casi 100 años se utilizan las ondas electromagnéticas para la transmisión de informaciones. Su utilidad se debe a que para propagarse no requieren necesariamente de un conductor metálico para que puedan viajar (las ondas electromagnéticas) con elevada velocidad, tanto en el vacío como en un medio dieléctrico.

La figura 2.1 brinda una reseña del espectro electromagnético y su utilización. La luz visible solamente ocupa la reducida zona que va desde los 380 nm (violeta) hasta los 780 nm (rojo). A la misma se le añade la zona de radiación ultravioleta, con longitudes de ondas menores y la zona de radiación infrarroja, con longitudes de ondas mayores.

En las telecomunicaciones por fibra óptica se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo cercano o sea de 800 a 1600 nm, siendo los valores preferidos los de 850, 1300 y 1550 nm.

En el vacío las ondas electromagnéticas se propagan con la velocidad de la luz 299792.456 Km/s.

Para la propagación en el aire se puede tomar con suficiente aproximación el valor redondo de  $C = 300000 \text{ Km/s}$ .

La onda electromagnética y por ende la luminosa es una onda transversal en un medio sin pérdidas e infinitamente extendido. Su campo eléctrico y magnético oscila perpendicularmente a la dirección de propagación.

Si el campo eléctrico o el campo magnético oscilan en un plano, el extremo del vector de intensidad de campo eléctrico o magnético describe una línea recta. De una onda de este tipo se dice que está polarizada linealmente.

Si el extremo del vector describe una circunferencia o, en general, una elipse se habla de luz con polarización circular o elíptica.

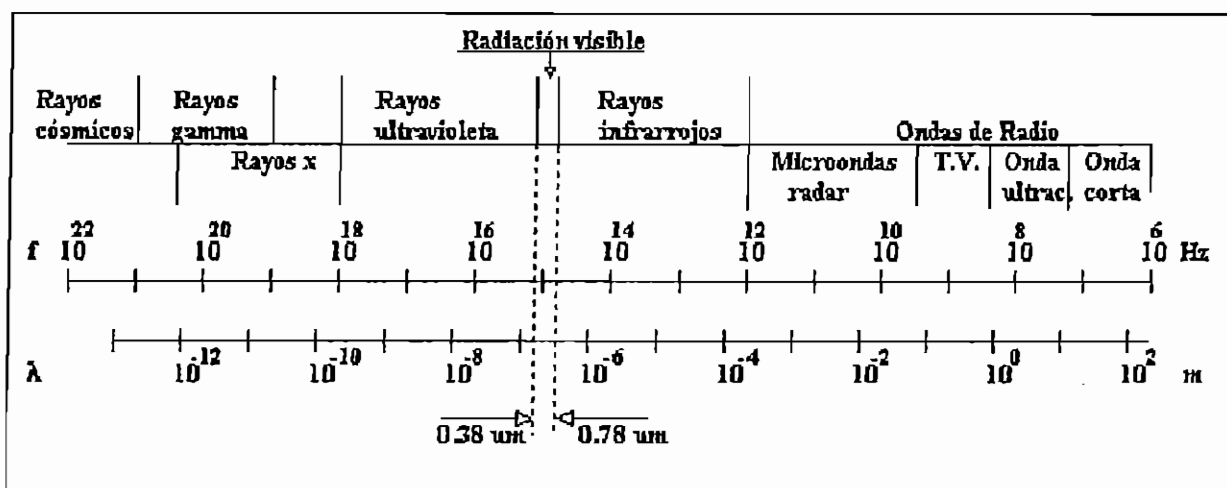


Figura 2. 1 Rangos del Espectro Electromagnético.

## 2.1.2 Definiciones

### 2.2.1.1 Fuentes Luminosas

Las fuentes luminosas ofrecen una fuente de energía única, que se transmite en paquetes pequeños discretos denominados fotones, los cuales tienen un nivel energético que se relaciona directamente con la frecuencia de la onda luminosa viajera, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\Delta W = E_g = h \cdot f [\text{Joules}] \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

donde:

$E_g$  = ancho de banda de energía prohibido

$h$  = la constante de Planck =  $6.62 \cdot 10^{-34}$

$f$  = la frecuencia de emisión

### 2.2.1.2 Unidades Básicas

Por conveniencia el espectro óptico es dividido en dos grandes partes: La invisible (infrarrojo y ultravioleta) y la visible. Los parámetros que definen la parte visible del espectro son conocidos como unidades fotométricas; y los de la parte invisible quedan definidos por las unidades radiométricas.

Las definiciones de estos dos tipos de unidades son análogas, con la diferencia de en lugar de decir "radiante" se dirá "luminoso" y viceversa. Los símbolos son los mismos diferenciándose en el subíndice: el mismo que es "e" para las radiométricas y "v" para las fotométricas.

A continuación definiremos las diferentes unidades usadas en Optoelectrónica:

#### Flujo Radiante - Flujo Luminoso.-

El flujo radiante,  $\phi_e$ , o potencia radiante es la energía radiada por unidad de tiempo.

Algunos autores la denominan potencia radiada  $P_e$ .

$$\phi_e = \frac{Q_e}{t} [Watt] \quad \text{Ecuación 2.2}$$

El flujo luminoso (o potencia luminosa  $P_v$ ) será:

$$\phi_v = \frac{Q_v}{t} [lumen = lm] \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

$$1 [lm] = 1.496 \cdot 10^{-10} [W]$$

#### Irradiancia.- Iluminancia.-

La irradiancia,  $E_e$ , es el flujo radiante incidente por unidad de área.

$$E_e = \frac{\phi_v}{A} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 2. 4}$$

La iluminancia o también llamada "iluminación" será:

$$E_v = \frac{\phi_v}{A} \left[ \frac{lm}{m^2} = lux = lx \right] \quad \text{Ecuación 2. 5}$$

Algunos autores usan como unidad de medida para la luz incidente en los receptores ópticos, a la **intensidad luminosa** (H), que se mide en pie-candela (f-c).

donde:

$$1 [f-c] = 1 [lm/pie^2]$$

### 2.1.3 Esquema de Bandas y Longitudes de Onda

La figura 2.2 nos muestra el esquema típico energético de un semiconductor con banda de conducción, banda de valencia, nivel donador y nivel aceptor así como otros términos que están situados más profundamente en la banda de separación energética. Este tipo de niveles se originan por ejemplo por adición de zinc y oxígeno al fósforo de galio (GaP) y fosforo arseniuro de galio (GaAs)P; ellos son de importancia decisiva para la generación de luz en estos semiconductores.

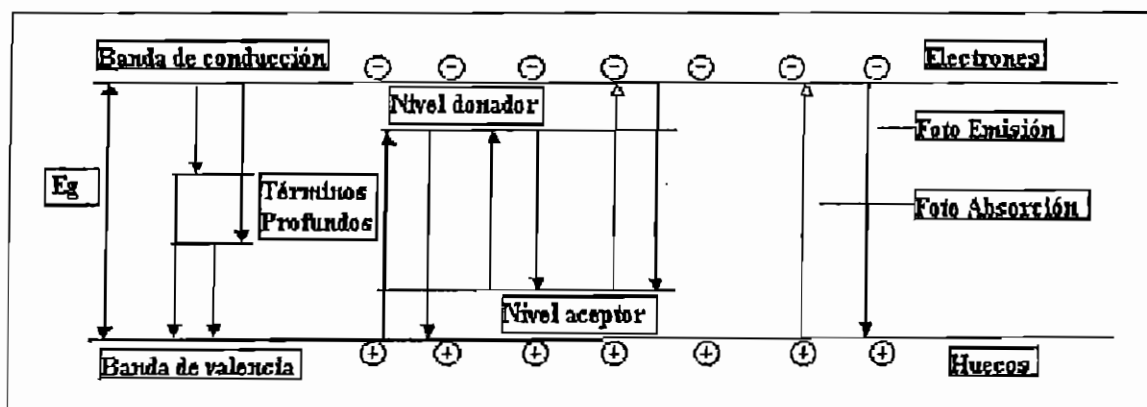


Figura 2. 2 Esquema de bandas para los diferentes niveles.

Debido a la portación energética desde el exterior (estímulo) se forman pares electrón-hueco. El semiconductor afectado de este modo se esfuerza para recuperar su estado de equilibrio por reunión apareada de electrones y huecos (recombinación). La energía que

se libera mediante estos procesos puede radiarse en forma de 1 cuanto de luz (luminiscencia).

Dependiendo de la situación energética del electrón y hueco se obtienen diversas posibilidades del paso por ejemplo de la banda de conducción a la banda de valencia, de la banda de conducción al nivel aceptor o entre niveles en la banda de separación energética. El semiconductor especial, su dopado y la temperatura definen cual de los procesos concurrentes es el dominante. En cualquier caso la energía del fotón emitido es menor o igual que la energía del semiconductor. La longitud de onda de la luz emitida depende de la energía del fotón.

A partir de la banda de separación energética  $E_g$  del semiconductor se obtienen las longitudes de ondas límites indicadas en la Tabla 2.1, no pudiendo generarse luz con longitud de onda más corta, sin embargo luz con longitudes de onda más largas se originan cuando tienen lugar transiciones entre niveles con menor separación energética que la banda de separación energética. La absorción de fotones (fenómeno fotoeléctrico interno) es el proceso inverso a la emisión fotónica. Un fotón puede desencadenar por absorción transiciones de electrones desde niveles más bajos a niveles más elevados. En el caso más sencillo se eleva un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción mediante la absorción de un fotón con la energía  $h\nu \geq E_g$  con lo que en la banda de valencia permanece un hueco (formación de pares), por lo que el par de portadores generados aumenta la conductividad del semiconductor. El silicio y el germanio pertenecen al grupo de estos fotodetectores intrínsecos importantísimos actualmente y muy avanzados en su tecnología. Para la fabricación de fotodetectores intrínsecos no es imprescindible material intrínseco.

Semiconductor	$E_g$ (300K) (eV)	$\lambda_{lim}$ (nm)	Transición de banda
Ge	0.7	1800	indirecta
Si	1.1	1100	indirecta
GaAs	1.4	840	directa
GaP	2.3	560	indirecta
SiC	2.8	440	indirecta
GaN	3.5	350	directa

Tabla 2.1 Bandas y longitudes de onda límites.



### 2.1.4 Esquema de Bandas en el Ambito de Impulso

La probabilidad para la recombinación radiante depende en primera línea de la estructura de banda del semiconductor en cuestión. El esquema de bandas en el ámbito del impulso nos da a conocer esta interdependencia.

Debido al impulso despreciable de los fotones solamente es posible (o bien es máxima) la recombinación radiante directa de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia cuando los extremos absolutos de la banda de conducción y banda de valencia están situados en la misma coordenada del impulso. El representante más conocido del grupo de semiconductores directos es el GaAs, cuyo extremo de banda está situado en el impulso 0.

En el grupo de los semiconductores indirectos cuyos representantes más importante son el germanio (Ge) y el silicio (Si) y el fosforo de galio (GaP), los extremos de banda están situados con diversos impulsos (el máximo de la banda de valencia está en el impulso 0; contrariamente el mínimo de la banda de conducción está situado en un impulso  $\neq$  de 0).

En el caso de la recombinación radiante en semiconductores indirectos tienen que participar terceros interlocutores como fotones y/o imperfecciones que proporcionen una igualación del impulso, por lo que la probabilidad para una transición radiante es menor en semiconductores indirectos que en los directos.

En los semiconductores indirectos como por ejemplo el GaP binario o el ternario  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  con  $x > 0.49$  ( $x < 0.49$ ; semiconductor directo) puede aumentarse considerablemente la probabilidad de recombinación radiante con ayuda de la recombinación a través de las denominadas imperfecciones isoelectrónicas. Las imperfecciones isoelectrónicas tienen la misma estructura electrónica de valencia y por lo tanto la misma valencia que la del átomo al que constituyen; sin embargo se diferencian de éste tan marcadamente en lo que se refiere a la negatividad electrónica y al volumen atómico que se puedan combinar portadores de carga. La imperfección isoelectrónica más conocida en el GaP y en el  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  es el átomo de nitrógeno en una posición de fósforo o de arsénico en la red cristalina. Estas imperfecciones asocian excitones sobre cuya descomposición se basa la recombinación radiante a través de estas imperfecciones. El aumento de la probabilidad de las transiciones radiantes se explica

por la fuerte asociación local del electrón a la imperfección isoelectrónica, según la relación de indeterminación de Heisenberg, condiciona una fuerte difuminación del impulso, debido a lo cual aumenta la probabilidad de que aparezcan electrones con el impulso apropiado para que se recombinen con un hueco en forma radiante. (ver figura 2.3)

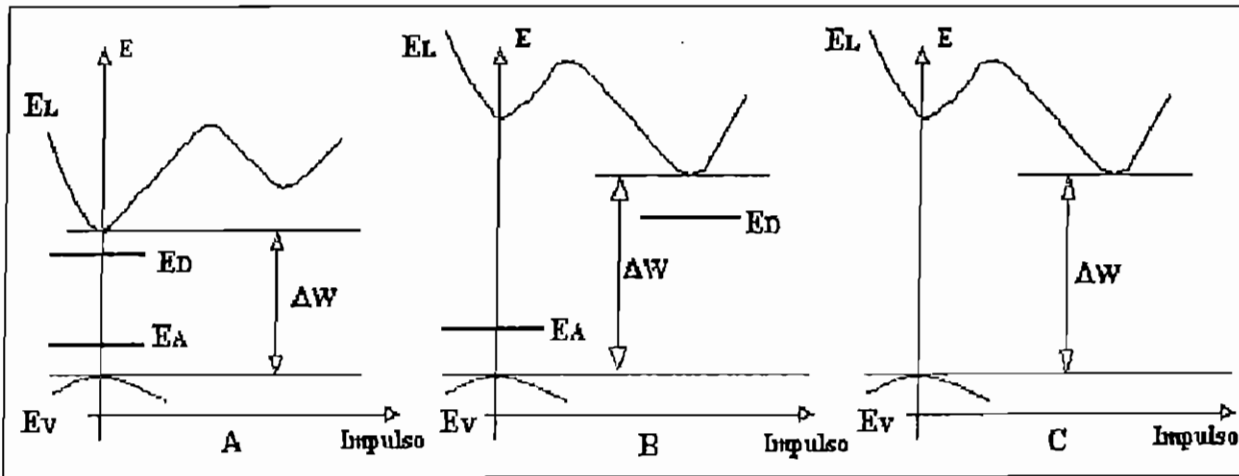


Figura 2.3 Esquema de bandas en el ámbito de impulso.

donde:

$E_L$  = nivel energético banda de conducción

$E_V$  = nivel energético banda de valencia

$E_D$  = nivel energético-donadores

$E_A$  = nivel energético-aceptores

A = directo

B = indirecto

C = indirecto con nivel energético nitrógeno.

### 2.1.5 Sensibilidad Espectral de Detectores

La figura 2.4 nos muestra el transcurso espectral de la fotosensibilidad de un fotodetector de silicio y de germanio. Adicionalmente se han anotado las posiciones de los máximos de emisión de los diodos electroluminiscentes más importantes y la sensibilidad del ojo humano. Ambos fotodetectores cubren el margen de longitud de onda de 300 hasta 1800 nm, siendo el detector de silicio de gran importancia puesto que cubre el margen visible y está bien adaptado al diodo electroluminiscente GaAs con su máximo de sensibilidad

en la proximidad de la región infrarroja; cuyas áreas de aplicación más conocidas son los telecomandos IR y las barreras ópticas. El límite de sensibilidad de los detectores semiconductores en el margen espectral de longitudes de onda largas se determina mediante la separación de la banda energética  $E_g$ . El coeficiente de absorción  $\alpha$  así como la relación de recombinación en el interior y en la superficie del semiconductor (pérdida de portadores) determina el transcurso de la curva de sensibilidad espectral en el resto del margen de longitud de onda. La caída de la curva hacia longitudes de onda más cortas se debe a la intensa absorción para la radiación de onda corta; debido a ello se generan pares de portadores solamente en las zonas próximas a la superficie, pero debido a la elevada velocidad de recombinación que predomina allí se pierden en su mayoría para la fotocorriente (esto es aplicable también para otros detectores semiconductores).

Para fabricar diodos electroluminiscentes en el margen espectral visible se necesitan semiconductores con separaciones de banda energética de por lo menos 1.8 eV. Aunque hay una multiplicidad de aleaciones de semiconductores (familias III-V ó II-VI de la tabla periódica) con separaciones de banda energética mayores que 1.8 eV, solamente se han impuesto unos pocos materiales en la aplicación comercial debido a las dificultades tecnológicas y a los rendimientos ópticos obtenidos en la práctica. Con los diodos electroluminiscentes que emiten en el margen espectral visible durante la evaluación hay que considerar la sensibilidad del ojo humano que en este caso sirve como detector; siendo decisivo para la impresión de color y luminosidad (que tiene al ojo delante del diodo emisor de la radiación) es la situación del espectro de emisión en relación con la curva de sensibilidad ocular. De forma que al ojo un diodo emisor de luz roja a 650 nm de por ejemplo 200 uW de potencia de radiación le parece con la misma luminosidad que un diodo emisor de luz verde de 560 nm con solamente una décima (20uW) de la potencia de radiación.

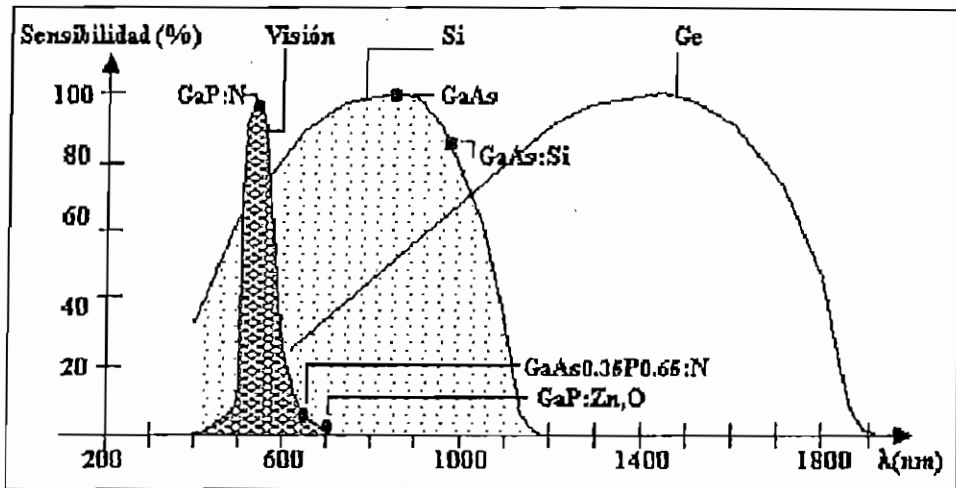


Figura 2.4 Gráfica de la sensibilidad en función de la longitud de onda.

### 2.1.6 Conceptos Básicos de las Ondas

Como concepto general se considera a una onda como la propagación de un estado o una excitación en una sustancia, sin que ello implique la necesidad de transportar la propia masa o materia de esa sustancia. En el caso de la onda luminosa, el estado es el campo electromagnético que propaga en una sustancia transparente, el medio óptico.

La forma más simple de describir la variación de esta onda en el tiempo y en el espacio es por medio de una función senoidal. Así, para el valor instantáneo  $a$  de una onda plana

que se propaga según el eje  $z$  vale:

$$a = A \cdot \text{sen}(wt - kz) = A \cdot \text{sen}\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda}\right)\right] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde:

$a$  = valor instantáneo de la onda plana (p. ej. intensidad del campo magnético o eléctrico o sus cuadrados)

$A$  = amplitud

$w$  = velocidad angular, en  $s^{-1}$

$t$  = tiempo, en  $s$

$k$  = índice de longitud de onda

$z$  = distancia sobre el eje  $z$ , en  $m$

$T$  = período, en  $s$

$\lambda$  = longitud de onda, en m

Con la amplitud A de la onda se describe la mayor elongación fuera de su posición de reposo.

El valor entre paréntesis ( $wt - kz$ ) se denomina ángulo de fase de la onda o en forma abreviada fase de la onda. Este ángulo de fase se mide en radianes.

Para ilustrar lo anterior en la figura 2.5 se representa una onda plana detenida en  $z = z_0$  y como función del tiempo t. Se observa que los puntos oscilantes  $a_1$  y  $a_3$  se hallan en la misma fase de oscilación con esa diferencia temporal de  $2\pi$ . En cambio, el punto  $a_2$  si bien tiene la misma elongación se halla en una fase diferente.

Al valor  $w$  se lo denomina velocidad angular y vale  $2\pi$  veces la frecuencia f, con la cual se indica el número de oscilaciones por unidad de tiempo, o sea:

$$w = 2\pi \cdot f \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

El tiempo en el que transcurre una oscilación completa se denomina período T de la oscilación. La frecuencia es inversamente proporcional al período T o sea:

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad \text{Ecuación 2.8}$$

con T período, en segundos.

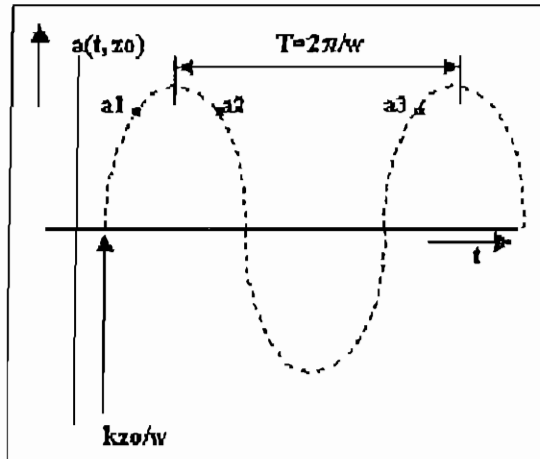
Con k se designa el índice de la longitud de onda que es igual al valor absoluto del vector de onda k que indica la dirección de la propagación de la onda. Este índice indica el desfase de la onda por unidad de longitud y por tanto es inversamente proporcional, con el factor  $2\pi$ , a la longitud de onda.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

La longitud de onda  $\lambda$  es el período espacial de dicha onda o sea la distancia o el camino de una oscilación completa. La relación básica entre la frecuencia f, la longitud de onda y la velocidad de propagación C de una onda es:

$$C = \lambda \cdot f \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Ecuación 2. 10

Figura 2. 5 Onda plana detenida en  $z = z_0$  y en función del tiempo.

### 2.1.7 Reflexión

Cuando una onda luminosa incide sobre la superficie de separación entre dos sustancias, una fracción de la misma se refleja. La proporción de la luz reflejada es función del ángulo  $\alpha_1$  que forma el rayo de luz incidente con la perpendicular a la superficie de separación. Por rayo de luz se entiende aquí la trayectoria dentro de la cual se extiende la energía luminosa. Para el rayo luminoso reflejado y el ángulo  $\alpha_2$  que éste forma con la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias, se cumple que:

- Se mantiene en el plano formado por el rayo luminoso incidente y la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias.
- Se halla en el semiplano opuesto (en relación con el rayo luminoso incidente a la perpendicular) a la superficie de separación de las sustancias.
- Tiene los ángulos de incidencia y reflexión iguales. (ver figura 2.6)

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

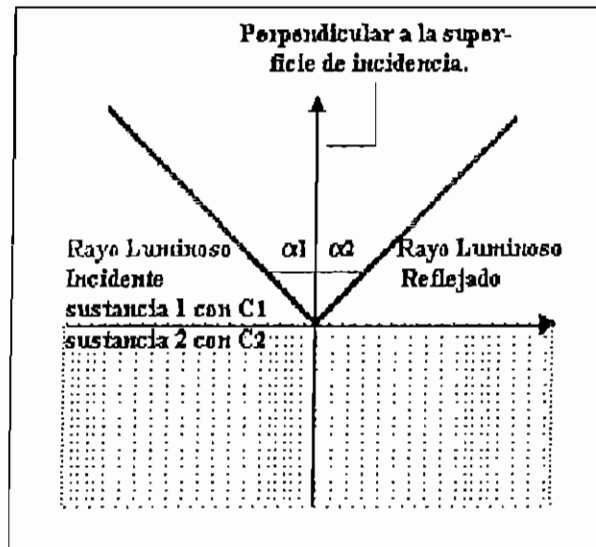


Figura 2.6 Reflexión de un rayo de luz.

### 2.1.8 Refracción

Si un rayo luminoso incide con un ángulo  $\alpha$  de modo oblicuo desde una sustancia ópticamente menos densa (por ejemplo aire) a otra más densa (por ejemplo vidrio o agua), su dirección de propagación se quiebra y su trayectoria continua en la segunda sustancia con un ángulo de refracción  $\beta$ .

Para una sustancia isotrópica, o sea un medio o material que presenta idénticas propiedades en todas sus direcciones, vale la Ley de Refracción de Snell:

El cociente entre el seno del ángulo de incidencia  $\alpha$  y el seno del ángulo de refracción  $\beta$  es constante e igual a la relación de las velocidades de la luz  $C_1/C_2$  en ambas sustancias. (ver figura 2.7)

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{C_1}{C_2}$$

Ecuación 2. 11

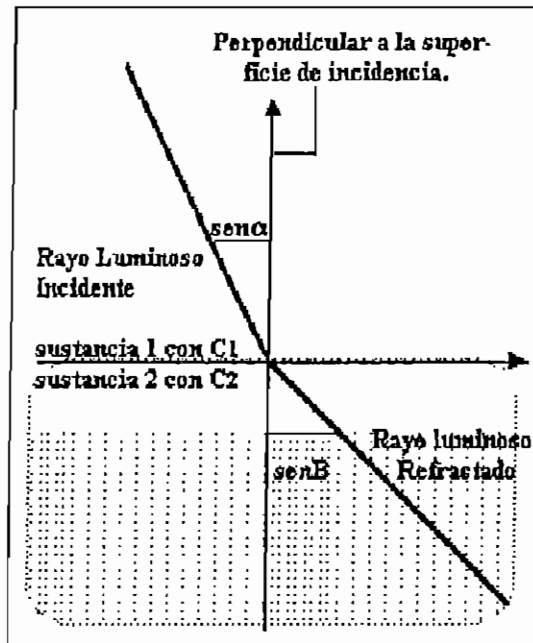


Figura 2. 7 Refracción de un rayo luminoso.

De dos sustancias transparentes, se considera más densa a aquella que posee la menor velocidad de propagación de la luz.

Considerando la transición desde el vacío (=aire) en el cual la velocidad de la luz es \$C\_0\$, a una sustancia con velocidad de la luz \$C\$, se obtiene:

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{C_0}{C} = n \quad \text{Ecuación 2. 12}$$

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío \$C\_0\$ y la de la sustancia \$C\$, se denomina índice de refracción \$n\$ (o más exactamente índice de refracción entre dos fases \$n\$) de esa sustancia y es una constante material de la misma. El índice de refracción del vacío (\$\approx\$aire) \$n\_0\$ es igual a 1.

Para dos sustancias diferentes con los índices de refracción \$n\_1\$ y \$n\_2\$ y las correspondientes velocidades de la luz \$C\_1\$ y \$C\_2\$ vale:

$$C_1 = \frac{C_0}{n_1} \quad \text{Ecuación 2. 13}$$

$$C_2 = \frac{C_0}{n_2} \quad \text{Ecuación 2. 14}$$



de donde se obtiene otra expresión de la Ley de la Refracción de Snell:

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ecuación 2. 15}$$

La relación del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es inversamente proporcional a la respectiva relación de los índices de refracción.

El índice de refracción  $n$  de una sustancia depende fundamentalmente de la correspondiente longitud de onda de la luz; en el caso del vidrio de cuarzo y las longitudes de onda del infrarrojo, de gran importancia para las comunicaciones ópticas, este índice decrece continuamente cuando se incrementa la longitud de onda.

La magnitud  $n$  vale para ondas luminosas que se propagan solamente con una única longitud de onda y con amplitud constante. En estas condiciones, las ondas no pueden transmitir informaciones, lo cual se logra sólo cuando se aplica modulación a las mismas.

En las comunicaciones ópticas (digitales) la modulación se efectúa por medio de pulsos luminosos. Se trata de grupos de ondas de corta duración que contienen ondas luminosas de diferentes longitudes.

Las diferentes ondas integrantes de estos grupos no se propagan con la misma velocidad ya que sus longitudes de onda difieren entre sí. La velocidad de propagación de un grupo de ondas se denomina velocidad de grupo para la cual se define el índice de refracción del grupo  $n_g$  por medio de la relación:

$$n_g = n - \lambda \cdot \left[ \frac{dn}{d\lambda} \right] \quad \text{Ecuación 2. 16}$$

Las variaciones de  $n$  y  $n_g$  en función de la longitud de onda luminosa  $\lambda$  para vidrio de cuarzo puro se observan en la figura 2.8 .

La expresión  $[dn/d\lambda]$  indica la pendiente de la curva de los índices de refracción  $n(\lambda)$  , la cual es decreciente (negativa) en la gama de las longitudes de onda considerada. En virtud de ello el índice de refracción de grupo  $n_g$  es, para cada longitud de onda, mayor

que el índice de refracción  $n$ . Para calcular los tiempos de propagación de señales ópticas se debe utilizar únicamente el índice de refracción de grupo  $n_g$ .

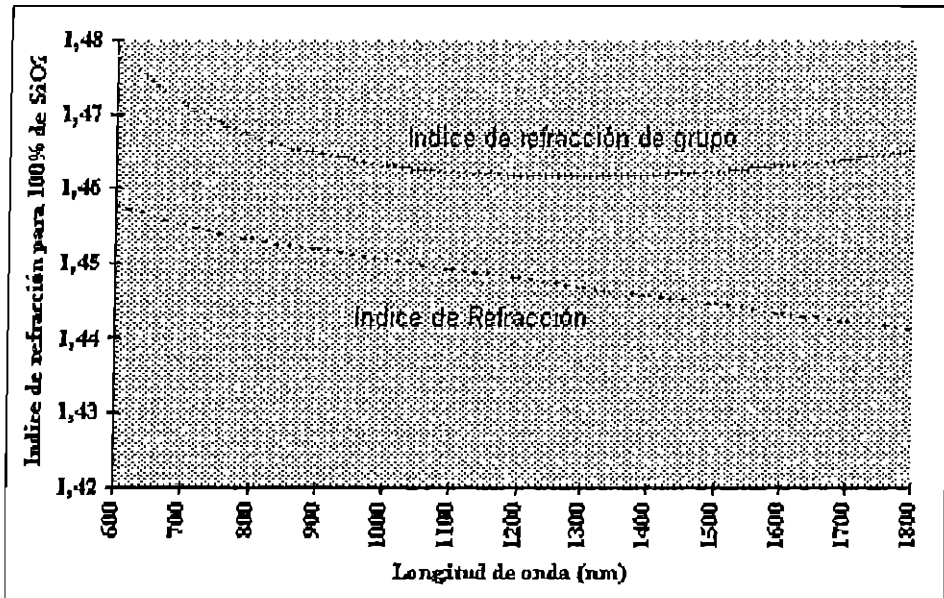


Figura 2. 8 Índice de refracción en función de la longitud de onda.

### 2.1.9 Reflexión Total

Cuando el rayo luminoso (3) incide con ángulo  $\alpha$  cada vez mayor desde una sustancia ópticamente más densa con un índice de refracción  $n_1$  sobre la superficie de separación con una sustancia ópticamente menos densa con índice de refracción  $n_2$ , el ángulo de refracción  $\beta$  al llegar a determinado ángulo de incidencia  $\alpha_0$  puede llegar a ser igual a  $90^\circ$ . (ver figura 2.9)

En este caso el rayo luminoso (2) se propaga paralelamente a la superficie de separación de ambas sustancias y el ángulo de incidencia  $\alpha_0$  se denomina ángulo límite de las dos sustancias.

Para el ángulo límite  $\alpha_0$  vale la relación:

$$\text{sen}(\alpha_0) = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{Ecuación 2. 17}$$

o sea el ángulo límite es función de la relación de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  de ambas sustancias.

Todos los rayos que inciden con un ángulo  $\alpha$  mayor que el ángulo límite  $\alpha_0$  son reflejados en la superficie que separa ambas sustancias, o sea no se propagan en la sustancia menos densa sino en la más densa.

Este fenómeno se denomina reflexión total (rayo luminoso 1).

La reflexión total puede ocurrir únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia ópticamente más densa (por ejemplo vidrio con  $n_1=1.5$ ) sobre otra ópticamente menos densa (por ejemplo aire con  $n_0=1$ ) y nunca se da en el caso inverso.

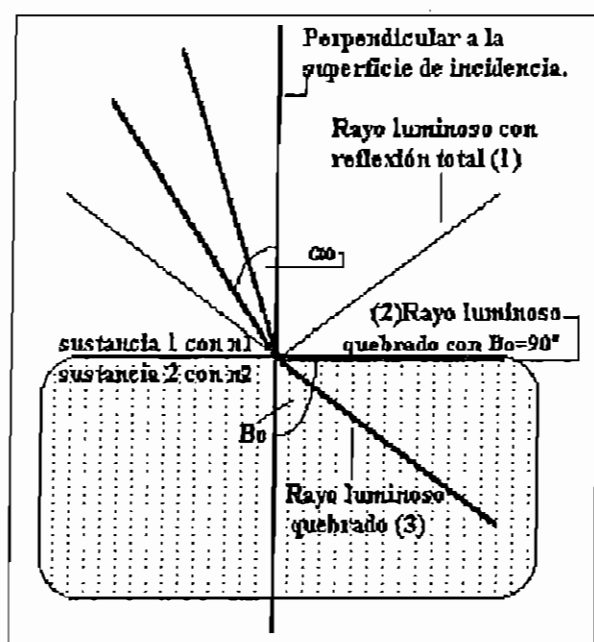


Figura 2.9 Rayo luminoso con reflexión total.

### 2.1.10 Apertura Numérica

En los conductores de fibra óptica se utiliza el efecto de la reflexión total para conducir el rayo luminoso en virtud de tener estos conductores en su centro un núcleo formado por un vidrio con un índice de refracción  $n_1$  y, envolviéndolo, un recubrimiento formado por un vidrio con un índice de refracción  $n_2$ . El valor de  $n_1$  es algo mayor que el de  $n_2$ . (ver figura 2.10)

Analizando la expresión:

$$\text{sen}(\alpha_0) = n_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

se concluye que todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menor que  $(90^\circ - \alpha_o)$  con respecto al eje de la fibra (aire con índice de refracción  $n_o=1$ ), el ángulo (entre el rayo luminoso y el eje de la fibra) se rige de acuerdo a la ley de refracción:

$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen}(90^\circ - \alpha_o)} = \frac{n_1}{n_o} \quad \text{Ecuación 2. 19}$$

$$\text{sen } \theta = n_1 \cdot \cos \alpha_o = n_1 \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2 \alpha_o} \quad \text{Ecuación 2. 20}$$

Considerando la condición del ángulo límite:  $\alpha_o = n_2/n_1$  se obtiene la expresión:

$$\text{sen } \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Ecuación 2. 21}$$

El máximo ángulo de acoplamiento  $\theta_{\max}$  se denomina ángulo de aceptación del conductor de fibra óptica y es únicamente función de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ . Al seno del ángulo de aceptación se le denomina apertura numérica (AN) del conductor de fibra óptica:

$$AN = \text{sen } \theta_{\max} \quad \text{Ecuación 2. 22}$$

Entonces:

$$AN = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \delta} \quad \text{Ecuación 2. 23}$$

donde:

$$\delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad \text{Ecuación 2. 24}$$

$\delta$  = diferencia relativa de los índices de refracción de los dos medios.

Este valor es de gran importancia para el acoplamiento de la luz a los conductores de fibra óptica.

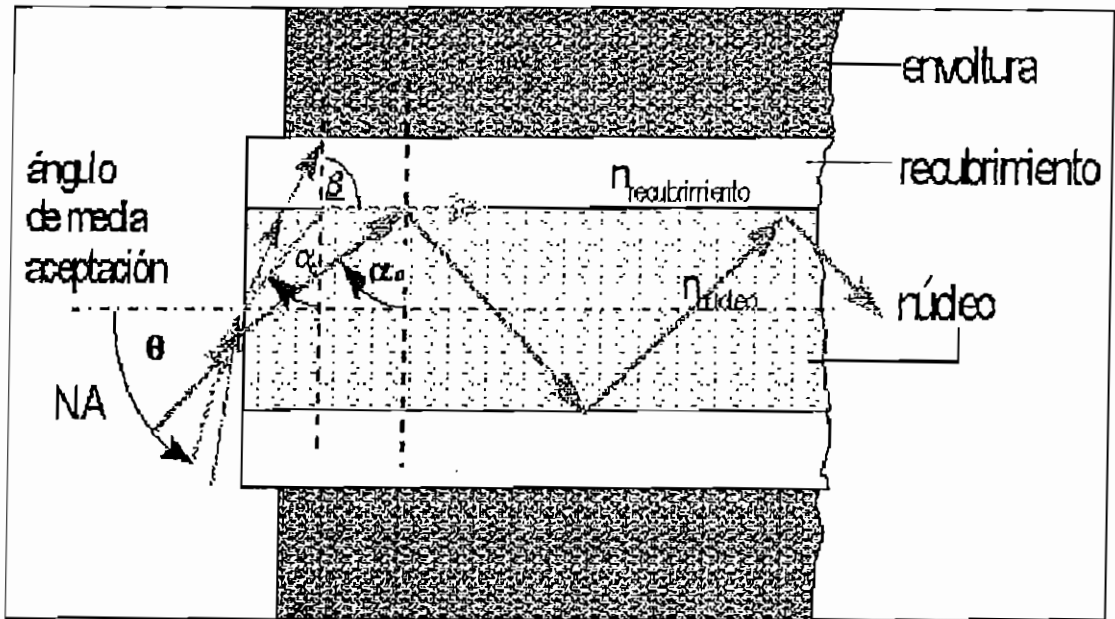


Figura 2. 10 Vista seccionada de una fibra óptica.

### 2.1.11 Modos de Propagación de la Luz en una Guía de Onda Cilíndrica

Si se quiere estudiar con rigor la propagación de la luz en el interior de una guía de onda cilíndrica (como ejemplo tenemos la fibra óptica), es preciso trabajar con las ecuaciones de Maxwell. Resolviéndolas se encuentra que la ecuación de propagación de la onda tiene varias soluciones, entre otras variables esta solución es función del diámetro de la fibra. Cada solución, llamada modo, equivale a un modo o forma diferente de propagación de la onda.

Al resolver las citadas ecuaciones aparece un parámetro  $V$  (o  $fc$ ), llamado frecuencia de corte normalizada, relacionado con el número de veces que el radio  $a$  de la guía contiene a la longitud de onda  $\lambda$ . Este factor depende de la longitud de onda que se está propagando, del diámetro del núcleo, del índice de refracción del mismo y de la apertura numérica,  $AN$ ; así tenemos:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{Ecuación 2. 25}$$

de donde se obtiene que:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot n_1 \cdot \sqrt{2\delta} \tag{Ecuación 2. 26}$$

donde:  $(2\pi)/\lambda = \beta_0$  es la constante de fase de la onda.

$$\beta_0 = \frac{w}{v} = \frac{2\pi \cdot f}{v} \quad \text{Ecuación 2. 27}$$

donde:

$f$  = es su frecuencia

$w$  = la pulsación o velocidad angular

$v$  = la velocidad de propagación de la onda

El parámetro  $V$  se usa para identificar el número posible de modos de transmisión en una guía de onda, demostrándose que para valores menores a 2.405 existe un único modo de propagación, llamado  $HE_{11}$ , mientras que para valores superiores es posible la existencia de más modos.

### 2.1.12 Tipos de Perfil del Índice de Refracción

Ayudándonos una vez más de la óptica geométrica podemos calcular la relación entre las longitudes de onda entre recorridos por un modo que sigue la dirección del eje de la guía y otro que incide en su cara con un ángulo  $\alpha_0$ . Llamada  $l$  a la longitud recorrida por un rayo axial y  $l_m$  a la correspondiente al modo  $m$ , se tiene:

(ver figura 2.11)

$$l_m = \frac{l}{\cos\beta} \quad \text{Ecuación 2. 28}$$

Luego aplicando la Ley de Snell, despejando  $\beta$  y reemplazando en la ecuación 2.28 obtenemos:

$$l_m = \frac{l}{\cos\left(\arcsen\left[\left(\frac{n_0}{n_1}\right)\text{sen}\alpha_0\right]\right)} \quad \text{Ecuación 2. 29}$$

La expresión anterior cuantifica la relación entre los caminos recorridos entre ambos modos. Es evidente que, si el índice de refracción  $n_1$  es constante, la velocidad de ambos modos será la misma y, siendo distintos los espacios recorridos, llegarán al extremo opuesto en diferentes instantes, produciéndose un retardo relativo.

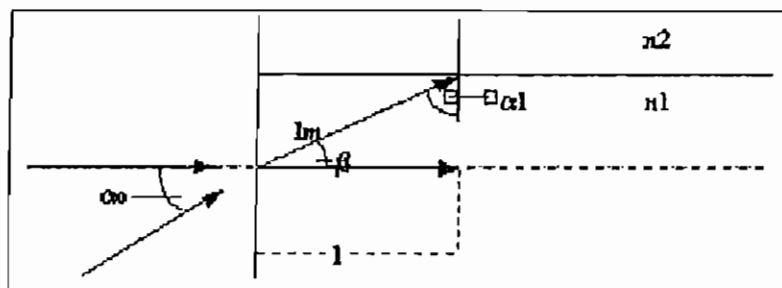


Figura 2.11 Trayectorias de dos modos.

## 2.2 EMISORES OPTICOS

Los emisores de semiconductores generalmente se los clasifica por el tipo de material del mismo, es decir, por el tipo de emisión. Así tenemos:

1. Los semiconductores directos, que son aquellos cuyo mayor porcentaje de energía radiada, en el proceso de recombinación electrón - hueco, es luminosa.

Como ejemplos de semiconductores directos tenemos: GaAs, GaInAsP, GaAlAs, GaAsP.

En cuanto a esta clase de semiconductores existe una clasificación generalizada de éstos que es la siguiente:

- LED's (diodos emisores de luz); rojos, verdes y amarillos fabricados de: GaAsP y GaP.
- IRED (diodos emisores de radiación infrarroja), que utilizan la base de: (GaAl)As , GaAs , GaInAsP e InP.
- LD (diodo láser), que usan la base de GaAlAs, GaAs, GaInAsP e InP.

Los LED's e IRED's tienen el mismo tipo de emisión; mientras que los diodos láser tienen otro principio de funcionamiento para la emisión de la luz.

En nuestro trabajo denominaremos diodos luminiscentes a los LED's e IRED's.

2. Los semiconductores indirectos, que son aquellos cuyo mayor porcentaje de energía radiada, en el proceso de recombinación electrón-hueco, se pierde en forma de calor. Como ejemplos de semiconductores indirectos tenemos: Si, Ge, P.

La emisión de la luz se presenta en dos diferentes formas que son el punto de partida para los diodos luminiscentes y diodos láser.



### 2.2.1 Emisión Espontánea

Se trata básicamente de una recombinación espontánea entre los electrones y los huecos, acompañada por fenómenos ópticos. Cuando hay exceso de electrones en la banda de conducción (ver figura 2.12), estos a veces espontáneamente caen en los huecos de la banda de valencia, emitiendo cada uno un fotón. Este fenómeno puramente estadístico, da lugar a una radiación incoherente en los diodos luminiscentes (LED e IRED).

Este fenómeno se explica en forma sencilla por medio de la figura 2.12 y recurriendo al modelo de las bandas energéticas de la zona de transición pn de un diodo semiconductor. Según esta representación en el material semiconductor tipo n hay un exceso de electrones en la banda de conducción, mientras que en la banda de valencia sobran huecos. Este desequilibrio se debe a la temperatura del material y gracias al fenómeno de difusión se llega a formar una zona de cargas especiales con una barrera de potencial, llamada tensión de difusión, la cual obstruye el intercambio de cargas entre las bandas.

Sin embargo, aplicando en esta situación una tensión externa en el sentido de conducción, la barrera de potencial puede ser rebajada hasta tal punto, que se llegue a un intercambio de cargas entre ambas zonas, dando origen a la recombinación de los pares electrón-hueco con la subsiguiente liberación energética principalmente en forma de fotones, además del calor. La zona en la cual se realizan estos fenómenos, se llama zona activa o zona de emisión.

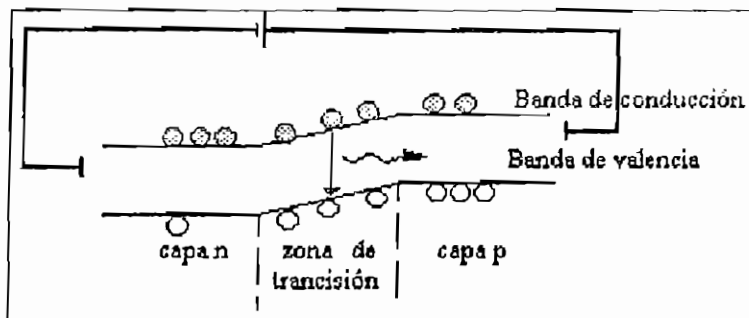


Figura 2. 12 Emisión espontánea en un diodo luminiscente.

### 2.2.2 Emisión Estimulada

La recombinación radiante entre electrones y huecos se realiza también en otra forma, por medio de la emisión estimulada, tal como ocurre en los diodos láser, "LD" (LASER DIODE). En este caso los fotones existentes en el semiconductor excitan a los portadores de carga excedentes para una recombinación radiactiva, o sea para emitir fotones, (ver figura 2.13), de la misma longitud y fase, como la luz estimulante ("emisión coherente"). Se tiene así una amplificación luminosa.

Es obvio, que previamente a este proceso será necesario elevar los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción sin absorber los fotones. Esto se obtiene inundando con portadores minoritarios la zona de unión pn por medio de una corriente directa. Cada fotón que incide, libera otro fotón llegando así a una verdadera avalancha de fotones.

Una forma muy práctica para producir los efectos de emisión en general es la inyección de los portadores de cargas de un lado de la juntura al otro, donde se recombinan con los portadores mayoritarios, que son más numerosos. Este mecanismo es de por sí idéntico a aquel en el cual se basa el funcionamiento del transistor.

#### Nota:

- El proceso de inyección de luz con la subsiguiente emisión de la luz se denomina "luminiscencia por inyección", común tanto para los LED e IRED como para los LD. De esta manera, la intensidad de la luz emitida se puede modular directamente por medio de la corriente de alimentación del diodo IRED y LD.

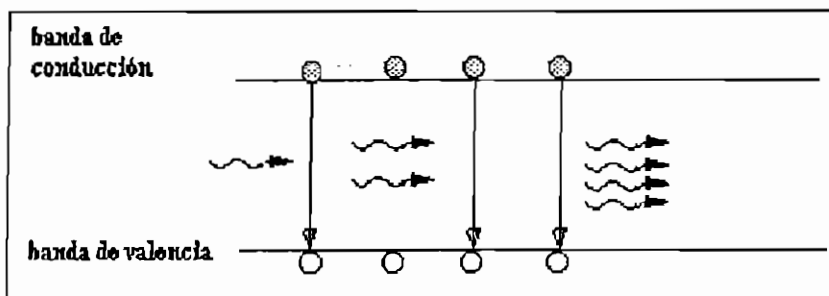


Figura 2. 13 Emisión estimulada en un diodo láser.

### 2.2.3 Tecnología de diversos Diodos Electroluminiscentes

Para generar una recombinación radiante eficaz en un semiconductor es necesario además de la elección de un material semiconductor apropiado, la existencia de portadores de carga minoritarios. El método más importante en la práctica para su generación es la inyección de portadores de carga minoritarios por una unión PN polarizada en sentido directo como en los LED usuales en el comercio. Para ello esta recombinación puede tener lugar como recombinación banda-banda o recombinación de excitones (sobre todo en los semiconductores directos) o también puede tener lugar mediante imperfecciones (especialmente imperfecciones isoelectrónicas en los semiconductores indirectos GaP y GaAsP).

Una condición forzosa para una recombinación radiante efectiva es una gran perfección cristalina, puesto que los defectos en el cristal actúan como centros de recombinación no radiantes. Para conseguir esta perfección se fabrican las uniones fotosensibles PN en capas por deposición epitaxial, cuyo crecimiento tienen lugar muy por debajo del punto de fusión del semiconductor. Por esta causa se rebaja la concentración del conjunto de imperfección que está condicionado térmicamente.

Los procedimientos más importantes para la fabricación de diodos electroluminiscentes son la epitaxia de fase líquida y la epitaxia de fase gaseosa.

La epitaxia de fase líquida suministra diodos con rendimiento cuántico muy elevado y de menor envejecimiento. Desde el punto de vista tecnológico este procedimiento está limitado ante todo a la deposición de sistemas binarios como GaAs y GaP. Los compuestos triples como GaAsP pueden deponerse en forma más elegante a partir de la fase gaseosa. Por supuesto que también GaAs y GaP pueden obtenerse por deposición a partir de la fase gaseosa, pero los diodos a partir de obleas epitaxiales de fase gaseosa no alcanzan la calidad que se obtiene a partir de obleas epitaxiales de fase líquida. La generación de las uniones PN pueden tener lugar con los dos procedimientos epitaxiales no sólo durante el crecimiento sino también posteriormente mediante difusión de un elemento de dopado idóneo; solamente forman una excepción el GaP:Z, los diodos 0 y los diodos GaAs dopados con silicio, en estos tienen lugar la formación de la unión PN ya durante el crecimiento de la capa epitaxial. Ver tabla 2.2.

Material Fotosensible	Sustrato	Epitaxia-fase gaseosa (VPE) Epitaxia-fase líquida (LPE)	Unión PN
GaP:N	GaP	VPE y LPE	Dif. y LPE
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> :N	GaP	VPE	Difusión
GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>	GaAs	VPE	Difusión
GaP:Zn,O	GaP	LPE	LPE
GaAs:Si	GaAs	LPE	LPE

Tabla 2.2 Procesos de fabricación de los diodos electroluminiscentes.

El semiconductor de aleación GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> es el semiconductor a partir del cual se fabrican la mayoría de los diodos emisores de luz roja. Mediante la elección del contenido de fósforo  $x$  entre 0 y 1 es posible ajustar la banda de separación energética entre la del GaAs ( $x=0$ ) de 1.47 eV hasta la del GaP ( $x=1$ ) con 2.2 eV. Por lo tanto se puede generar luz con longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el margen espectral visible verde. Ciertamente el rendimiento óptico con valores de  $x$  por encima de 0.4 disminuye. El cristal mixto con  $x=0.4$  (la separación energética es entonces de 1.9 eV) suministra diodos luminiscentes rojos con buenos rendimientos ópticos con una longitud de onda en un máximo de radiación a 660 nm. En los pasados años también se consiguió alcanzar rendimientos ópticos utilizables comercialmente para valores de  $x$  mayores que 0.4. Esto sucedió debido a la incorporación adicional de átomos de nitrógeno cuyo efecto se basa en la aptitud para asociar electrones. Mediante un dopado de nitrógeno adicional es posible fabricar diodos electroluminiscentes para el margen espectral rojo y amarillo con buenas ganancias ópticas.

El arseniuro de galio con una banda energética de 1.47 eV se ha impuesto como material semiconductor para diodos infrarrojos. El máximo de la energía radiada está situada según la fabricación y el dopado entre longitudes de onda de 850 y 950 nm. Los datos de funcionamientos típicos de los diodos luminiscentes infrarrojos son de aproximadamente 1.3 V y 10 a 100 mA de corriente continua, siendo la potencia de radiación entregada de 0.2 hasta 15 mW.

También han sido analizados materiales semiconductores como el arseniuro de aluminio galio (GaAl)As, el fosfuro de galio indio (InGa)P y el fosfuro de aluminio indio (InAl)P; no siendo conocidos todavía ningún rendimiento utilizable rentablemente con excepción del (GaAl)As. Esto también es aplicable para la generación de luz azul aunque en este

caso se publican resultados prometedores sobre todo con el nitruro de galio (GaN) y para una modificación del carburo de silicio (SiC). Ver tabla 2.3.

Material Fotosensible	Color ( $\lambda$ de la máxima emisión en nm)	Rendimiento cuántico externo (%)	Rendimiento óptico (lm/W)
GaP:N	Verde (565)	0.05 bis 0.7	0.36 bis 2.16
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> :N	Rojo (640)	0.3 bis 0.5	0.57 bis 0.95
GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>	Rojo (660)	0.2 bis 0.3	0.15 bis 0.23
GaP:Zn <sub>2</sub> O	Rojo (698)	2.0 bis 12.6	0.4 bis 2.52
GaAs:Si	IR (950)	12 bis 28	

Tabla 2.3 Rendimiento de los fotodiodos.

## 2.2.4 Diodos Luminiscentes

### 2.2.4.1 Diodos Luminiscentes en el Espectro Visible (LED)

Los diodos luminiscentes para el espectro visible se basan en el arseniuro-fosfuro de galio (GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>). En estos sistemas cristalinos compuestos, la separación entre bandas se puede elevar, aumentando la componente de fósforo (de  $x=0 \dots 1$ ) desde el valor de 1.43 eV para el GaAs ( $x=0$ ) hasta el valor de 2.2 eV para GaP ( $x=1$ ). De este modo, la correspondiente longitud de onda puede desplazarse desde el infrarrojo próximo hasta la zona verde del espectro visible. El semiconductor es directo hasta una composición de  $x=0.49$  a  $E_g=1.9$  eV (que corresponde al color rojo), e indirecto por encima de ella. El material que se utiliza para LED's rojos es la composición, situada todavía en la zona directa, de  $x=0.4$ , o sea el GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>.

El conocimiento de que también en la zona indirecta del sistema cristalino compuesto puede crearse una recombinación radiante efectiva aportó un gran progreso en la tecnología de los LED's. Se logra dicho efecto incluyendo determinados puntos de distorsión isoelectrónicos, que no contribuyen al equilibrio de portadores de carga en el semiconductor. Pero a causa del diferente blindaje nuclear con respecto a los átomos de la red, pueden aparecer portadores de carga. En este caso puede recombinarse una pareja electrón-hueco (excitón) con emisión de radiación, y la compensación del impulso se produce por medio del punto perturbador isoelectrónico. La recombinación de una pareja electrón-hueco transcurre, pues a nivel de siseo. El punto de perturbación más importante

en el  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  con  $x > 0.49$  es el átomo de nitrógeno y también la pareja cinc-oxígeno en el GaP. (ver figura 2.14)

Los colores rojo - naranja y amarillo se logran con  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , es decir, el rojo - naranja con el enlace  $\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}\text{N}$ , y el amarillo con el enlace  $\text{GaAs}_{0.15}\text{P}_{0.85}\text{N}$ . Los LED's de GaP con impurezas de nitrógeno emiten luz de color verde, mientras que los de GaP con impurezas de Zn-O pueden emitir luz roja.

Para la fabricación de LED's que luzcan en azul sólo se consideran semiconductores con una separación entre bandas  $\geq 2.6$  eV. Estos semiconductores están menos investigados que los de GaAsP, y su dominio tecnológico entraña todavía grandes dificultades.

Pero se han conseguido fabricar LED's de luz azul con SiC, aunque por el momento no se ha desembocado en una producción en masa de coste satisfactorio. Su empleo está limitado, por tanto, a aplicaciones especiales.

Los LED's se ofrecen en cápsulas de plástico. En esta presentación, al cuerpo de plástico transparente corresponde no sólo la función necesaria de protección como en los demás componentes de semiconductores, sino también las de desacoplamiento de radiación y de conducción del rayo. Por una parte, con el plástico se reduce el ángulo de reflexión total para el rayo emergente del diodo y con ello se eleva el desacoplamiento de la radiación, y por otro lado la superficie curva actúa como lente e influye en la característica de radiación del LED. Al plástico pueden añadirse un difusor para influir en la característica de radiación y colorante para aumentar el contraste.

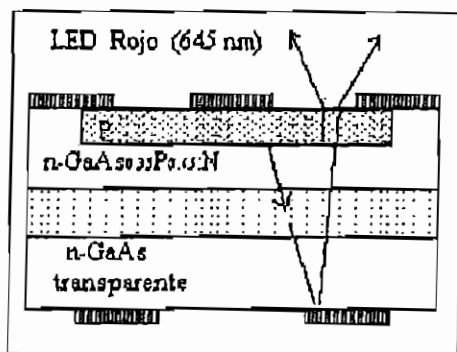


Figura 2. 14 Vista seccionada de un LED.

Como ya sabemos, un LED en general está formado por una unión PN, la cual al ser polarizada directamente, genera energía luminosa. En la figura 2.15 podemos observar el símbolo y la polarización de un LED.

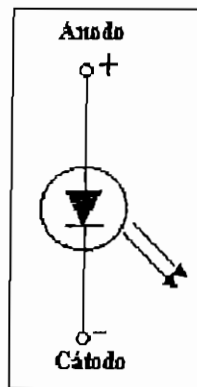


Figura 2. 15 Símbolo y polarización de un LED.

A continuación veremos un circuito de polarización básico para este tipo de diodo luminiscente:

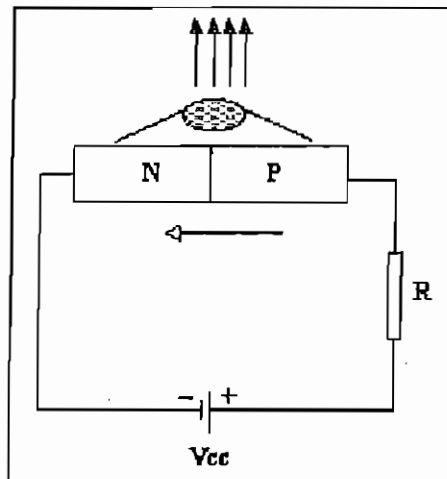


Figura 2. 16 Circuito de polarización de un LED.

Para estos diodos la característica de voltaje de adelanto ( $V_F$ ) en función de la corriente de adelanto ( $I_F$ ), llamada también de paso, es muy similar a la de cualquier diodo; como podemos ver en la figura 2.17.

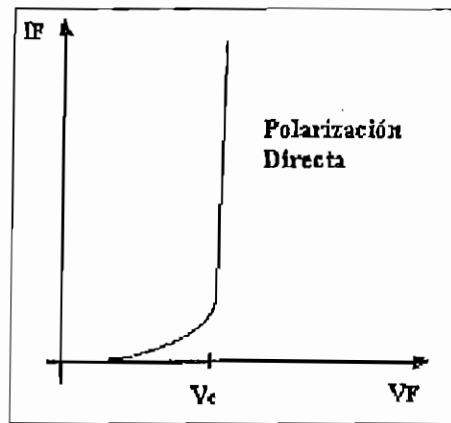


Figura 2. 17 Característica de  $I_F$  vs.  $V_F$  de un LED

#### 2.2.4.2 Aplicaciones:

Las principales aplicaciones de los LED's son:

- Las hileras de 1 a 10 LED's individuales se pueden alinear una tras otra indefinidamente. Son muy adecuadas para la formación de disposiciones visualizadoras complejas, como escalas y displays (pantallas) grandes.
- En la industria del automóvil, como pilotos indicadores por diodos emisores de luz, además que comunican información al conductor con escalas multicolores o bien de forma alfanumérica con visualizadores de LED's (displays); otra posibilidad son el control directo del funcionamiento de los faros o de todo el equipo de iluminación.
- Para alarmas de incendio y equipos para la supervisión de candencia.
- Para la inspección de instrumentos ópticos y de procesos de encendido.
- Se usa también en visualizadores numéricos y alfabéticos en voltímetros digitales, balanzas, cajas registradoras, surtidores de gasolina, indicadores de frecuencia y de canal en aparatos de radio y de televisión.

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.1.

#### 2.2.4.3 Diodos Luminiscentes de Rayos Infrarrojos (IREB)

Los diodos luminiscentes IR se basan en el GaAs (emiten en la banda próxima al espectro infrarrojo), cuya separación de bandas se sitúa en 1.43 eV, lo que corresponde a



una emisión de 930 nm aproximadamente. Con ellos se pueden lograr mayores rendimientos cuánticos externos que los logrados en los diodos luminiscentes para el espectro visible. En la figura 2.18 se representa la estructura esquemática del cuerpo de un diodo IRED de GaAs con impurezas de Silicio. La capa activa (o zona activa), de gran perfección cristalina, puede recubrir un sustrato de GaAs utilizando la separación epitáctica de la mezcla fundida (LPE=liquid phase epitaxy =epitaxia de fase líquida). Por el carácter anfótero del punto perturbador de silicio, se forma por sí misma una transición pn durante el proceso de separación. Las impurezas de silicio mantienen la emisión en 950 nm. Una parte de la radiación abandona el cuerpo del diodo directamente por la radiación contigua. Pero también la radiación emitida en el sentido del sustrato es aprovechable. Para ello se azoga la cara posterior del diodo y sirve de superficie reflectora.

Los IRED's de GaAs se montan en cápsulas de plástico o en cápsulas estancas de vidrio-metálicas.

El perfeccionamiento de los IRED's por epitaxia en líquido con impurezas de Silicio pretende la ampliación del espectro de longitudes de onda. El carácter anfótero de las impurezas de Silicio permanece en el cristal combinado ternario (GaAl), en el cual con la componente de Aluminio puede modificarse la separación de bandas. De ello resulta la posibilidad de generar longitudes de onda en el intervalo entre 850 y 900 nm y ajustar los diodos emisores al máximo de sensibilidad de los detectores. Con detectores de sensibilidad selectiva se podrían, construir por consiguiente, sistemas de transmisión con dos (o más) canales ópticos separados.

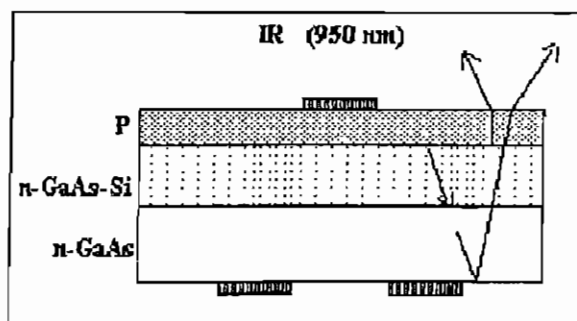


Figura 2.18 Vista seccionada de un IRED.

El IRED por ser un emisor de radiación se polariza directamente, en la figura 2.19 podemos observar el símbolo y la polarización para este diodo luminiscente.

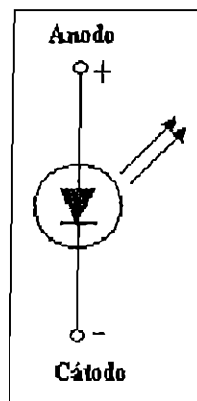


Figura 2. 19 Símbolo y polarización de un IRED.

En la figura 2.20 podemos observar el circuito básico de polarización para un IRED.

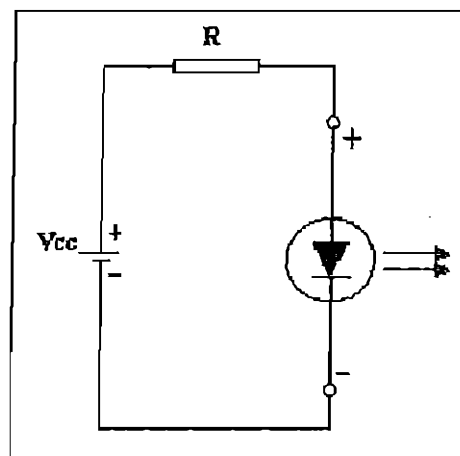


Figura 2. 20 Circuito de polarización de un IRED.

La característica de corriente de adelanto en función del voltaje para un IRED, lo podemos ver en la figura 2.21.

Como podemos ver en esa figura existe así mismo un voltaje de operación para el IRED, a partir del cual existe una región lineal (depende del material del que está hecho el diodo) en la que se puede trabajar con este diodo luminiscente.

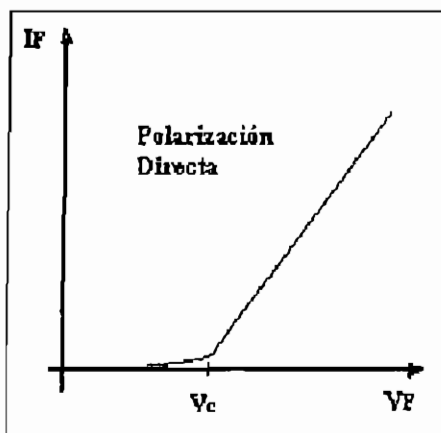


Figura 2. 21 Característica de un IRED. (IF vs. VF)

#### 2.2.4.4 Aplicaciones:

Sus principales aplicaciones son:

- En barreras luminosas para el control de la producción.
- En lectoras de fichas y cintas perforadas.
- En mandos a distancia por rayos infrarrojos de televisores, puertas de garage, equipos de iluminación, de máquinas, etc.
- En medición de distancias y ángulos por rayos infrarrojos; para el posicionamiento de máquinas y herramientas.
- En acopladores ópticos.
- En transmisión de datos por fibra óptica (con IREDs de alta potencia). Los últimos se caracterizan por la posibilidad de modular hasta la banda de los GHz y por una anchura de líneas extremadamente estrecha.
- La transmisión de sonido por rayos infrarrojos en la radio.
- Es de especial utilidad en los casos en que la función de mando por rayos infrarrojos sea codificada (modulada) para garantizar su protección contra su operación no autorizada.

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.8.

### 2.2.4.5 IRED's para Guías de Ondas Ópticas (LWL)

Junto al IRED de GaAs con impurezas de Silicio, se ofrece un diodo de GaAs difundido con Zn para aplicaciones que requieren breves tiempos de respuesta. Este diodo es especialmente adecuado para su inclusión en sistemas de transmisión de señales por medio de fibra óptica, concebidos para bajas velocidades de transmisión de hasta 10 MHz y recorridos cortos, hasta alrededor de 100 m. La longitud de onda de emisión de este diodo se sitúa en 900 nm.

La estructura del diodo se reproduce en forma esquemática en la figura 2.22. Al contrario del IRED de GaAs con impurezas de silicio, el diodo no posee capa epitáctica, pues representa portadores minoritarios de larga vida y por tanto tiempos de respuesta de unos 500 ns. Para lograr un alto rendimiento, se parte de un material de substrato con escasa densidad de dislocación.

En cuanto a la radiación generada, la absorción no es despreciable como en el caso del diodo de GaAs con impurezas de silicio. Antes al contrario, la radiación que se propaga por el interior del cristal se absorbe casi por completo.

A causa de las desfavorables condiciones de desacoplamiento y de la escasa perfección del cristal, la potencia de radiación alcanzable con el IRED de GaAs difundido es menor en un factor de 10 que la del diodo de GaAs con impurezas de silicio.

El diodo de GaAs difundido se ofrece con un soporte metálico y aislante plano de plástico. De esta forma, el diodo puede acoplarse a una fibra óptica.

Para aquellas aplicaciones en la que se necesita mayor modulabilidad y mayor potencia radiante, se dispone de IRED de gran potencia y de diodos láser.

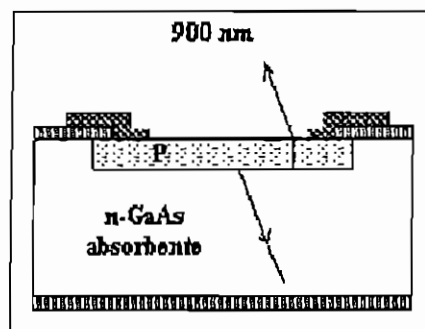


Figura 2. 22 Vista seccionada de un IRED para una guía óptica.

Un diodo luminiscente es un diodo semiconductor con emisión espontánea, difusa e incoherente.

A continuación definiremos las principales características de los diodos luminiscentes.

### 2.2.5 Rendimiento Óptico de Diodos Luminiscentes

Su rendimiento óptico es relativamente bajo a causa de las siguientes pérdidas:

- La reflexión total en la superficie del cristal hace retornar hacia el interior una gran parte de la luz generada penetrando al aire no más que 1.4%.
- La energía liberada durante la recombinación toma también otras formas, distintas de la energía óptica, tales como oscilaciones reticulares, calor, etc.
- Una parte de los electrones en exceso pierden su energía en choques con otros (efecto lugar).

El rendimiento óptico se puede mejorar con la elección del material semiconductor y con la estructura del diodo. (ver figura 2.23)

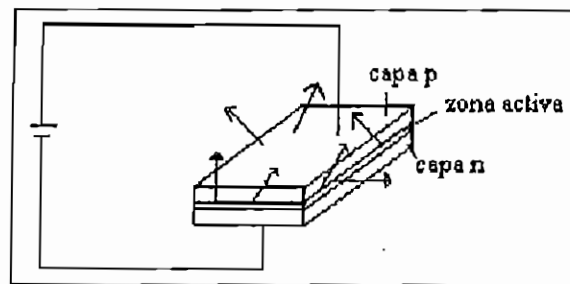


Figura 2. 23 Emisión incoherente de un diodo luminiscente.

### 2.2.6 Estructuras Básicas de los Diodos Luminiscentes

Las estructuras en los diodos luminiscentes se usan básicamente para el mejor rendimiento óptico del elemento debido a su mejor acoplamiento con la fibra óptica.

Para la fabricación de los diodos luminiscentes se dispone de numerosas técnicas que no pueden ser tratadas aquí con más detalles, por eso hablaremos solamente de las más usuales.

### 2.2.6.1 Diodo Luminiscente con Superficie de Emisión Extensa

En un cristal semiconductor homogéneo se forma una juntura -pn- por medio de la difusión de un material donador. La capa -p- se encuentra montada sobre una base absorbente de calor que le sirve a la vez como conexión a la fuente de poder, mientras que la zona -n- tiene conexión a la fuente por un contacto puntual. La luz es emitida por toda la superficie de la unión -pn- cuya sección de algunos mm<sup>2</sup> alcanza a alimentar un paquete de fibras. (ver figura 2.24)

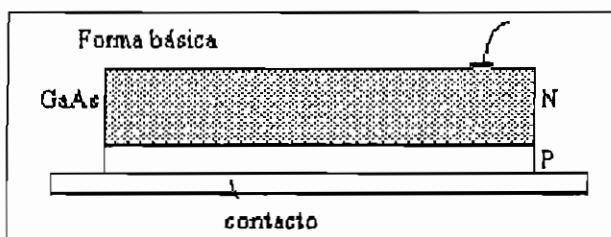


Figura 2. 24 Estructura básica del diodo luminiscente.

### 2.2.6.2 Diodo Luminiscente Tipo "Burrus"

La estructura de esta clase de diodo emisor es tal que sirve para alimentar una sola fibra embutida en una cavidad con fines de minimizar la absorción de la luz emitida que se genera directamente debajo de la cavidad debido a la ubicación y geometría del contacto de la corriente inyectada. (ver figuras 2.25 y 2.26)

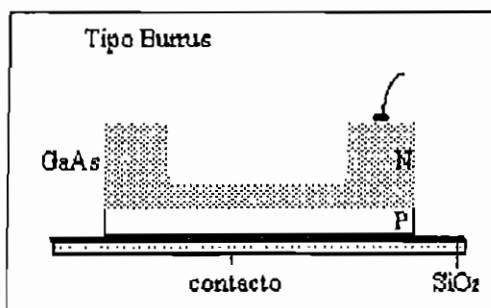


Figura 2. 25 Estructura tipo Burrus de un diodo luminiscente.

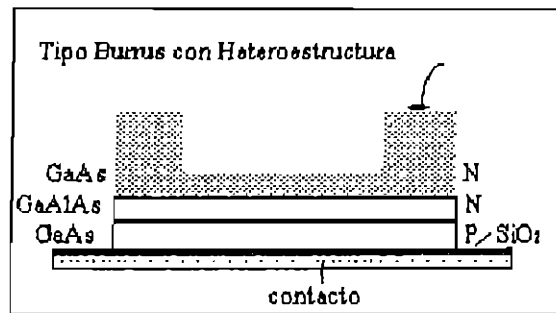


Figura 2. 26 Diodo luminiscente Tipo Burrus con Heteroestructura.

### 2.2.6.3 Diodo Luminiscente Tipo "Burrus de Heteroestructura"

Las características típicas de esta clase de diodos pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- Las pérdidas por absorción en el cristal son eliminadas totalmente colocando un material transparente entre la zona activa y la fibra. Con este objetivo se colocan varias capas de cristales de GaAlAs variando a la vez su contenido de aluminio (heteroestructura). (ver figura 2.27)
- Concentración electrónica en la zona de recombinación del GaAs. Las dos capas adicionales del GaAlAs generan una verdadera barrera de potencial para las cargas inyectadas en la capa del GaAs. Esto se debe al hecho, de que la diferencia energética entre la banda de valencia y la banda de conducción del GaAlAs supera a la diferencia respectiva del GaAs con un  $E_g = 2 \text{ eV}$ , causando una concentración de electrones muy alta especialmente en la zona de recombinación con el subsiguiente aumento de la eficiencia radiactiva.
- Confinamiento de la luz generada en la zona activa. El índice de refracción de las capas GaAlAs es más bajo que el de GaAs. Debido al fenómeno de reflexión total que se produce en esta situación, la mayor parte de la luz emitida se queda encerrada dentro de la zona activa rebajando así las pérdidas por radiación.

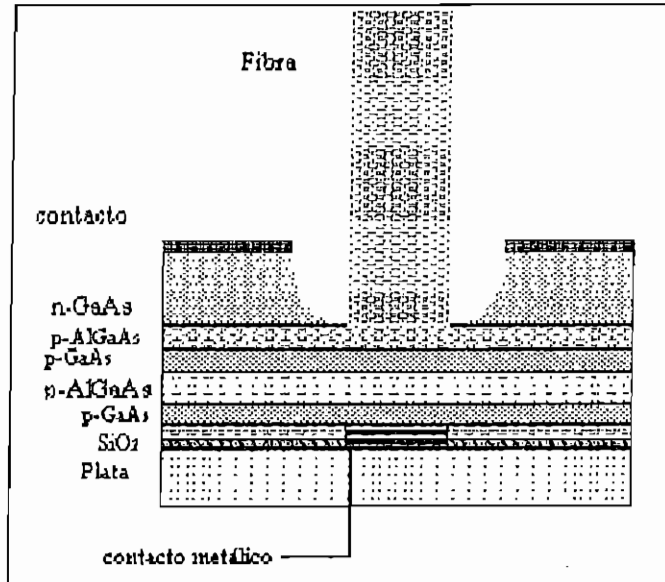


Figura 2. 27 Diodo luminiscente con heteroestructura.

**2.2.7 Característica de Transferencia de entrada/salida.**

**Corriente Eléctrica/Potencia Óptica de Diodos Luminiscentes**

Las características típicas de la potencia óptica en función de la corriente eléctrica se muestran en la figura 2.28, en dos condiciones diferentes de temperaturas.

Como vemos para el diodo luminiscente la potencia óptica es aproximadamente proporcional a la corriente. La emisión comienza ya con corrientes muy pequeñas.

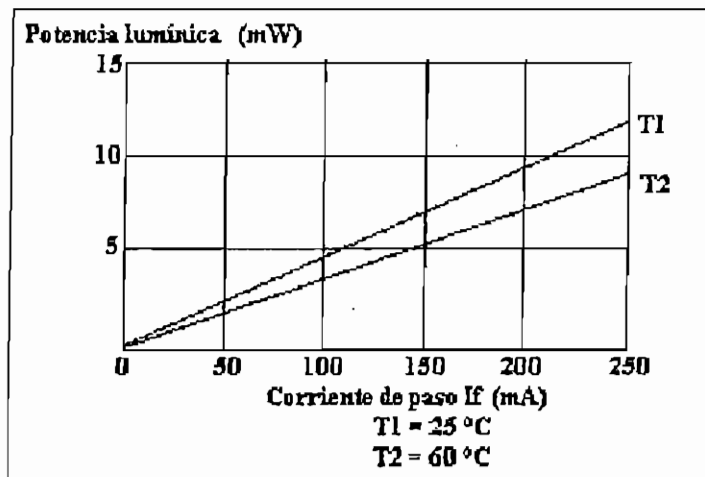


Figura 2. 28 Característica potencia/corriente a diferentes temperaturas.



### 2.2.8 Area de Emisión de los Diodos Luminiscentes

El área de emisión de un diodo luminiscente es por lo menos tan grande como la sección transversal de la fibra y su distribución angular abarca casi la totalidad del ángulo espacial.

La potencia óptica acoplada máxima a la fibra estará dada por:

$$P_{\text{óx}} = \pi \cdot B \cdot S_T \cdot AN^2 \cdot \gamma \quad \text{Ecuación 2. 30}$$

donde:

$B$  = densidad óptica.

$S_T$  = sección transversal de la fibra.

$AN$  = Apertura numérica.

$\gamma = 1$  para perfil escalonado.

$\gamma = 0.5$  para perfil gradual.

La eficiencia del acoplamiento se puede calcular por medio de la expresión:

$$\eta = \frac{S_T}{S_L} \quad \text{Ecuación 2. 31}$$

donde:

$S_L$  = superficie activa del diodo.

### 2.2.9 Espectro de los Diodos Luminiscentes

El espectro de luz emitida por los diodos semiconductores es un factor decisivo para la limitación del ancho de banda utilizable en la transmisión, como así mismo para el ensanchamiento de los pulsos en la fibra debido a la dispersión del material, fenómeno que limita la velocidad de la transmisión digital.

En el diodo luminiscente debido a la radiación incoherente, la distribución espectral de los diodos luminiscentes es continua y puede ser descrita por la función de Gauss:

$$P_{\lambda} = P_{\lambda_0} \cdot e^{-\pi \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2} \quad \text{Ecuación 2. 32}$$

donde:

$P_{\lambda_0}$  = es la potencia emitida a una longitud de onda  $\lambda_0$ .

$\lambda$  = es la longitud de onda

$\Delta\lambda$  = es el ancho espectral de la campana de Gauss.

Esta distribución (ver figura 2.29) alcanza su máximo para  $\lambda_0$  y se caracteriza por el ancho  $\Delta\lambda$ , igual al ancho de un rectángulo cuya área es equivalente a la de la campana.

Valores típicos de  $\Delta\lambda$ :

- diodo de GaAlAs :  $\Delta\lambda = 30$  a  $40$  nm
- diodo de InGaAsP:  $\Delta\lambda = 80$  a  $120$  nm.

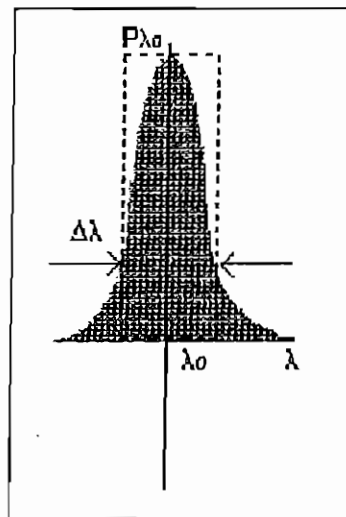


Figura 2. 29 Distribución espectral de un diodo luminescente.

### 2.2.10 Diodo Láser (LD)

Es un diodo semiconductor con emisión estimulada coherente en fase y frecuencia, lo que se obtiene por medio de un elemento selectivo de la longitud de onda, llamado el resonador óptico de Fabry-Perot.

La estructura básica en los LD se encuentra representada en la figura 2.30. Sin embargo, la realización práctica de esta clase de fuente óptica resulta mucho más complicada, debido a la corriente de umbral. (que se definirá más adelante).

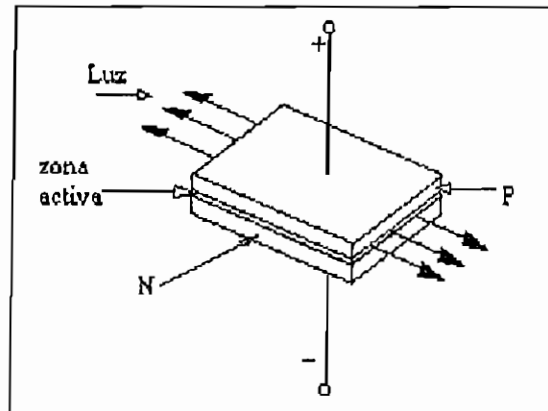


Figura 2. 30 Esquema básico de un diodo láser.

### 2.2.10.1 Resonador Óptico

Todo láser consta de un resonador óptico y de un medio activo y amplificador que se encuentra en el resonador. El resonador óptico está constituido por dos espejos. Uno de ellos es semitransparente (en un tanto por ciento), con lo cual una parte de la energía almacenada en el resonador puede desacoplarse y ponerse a disposición como potencia de salida del oscilador.

Los espejos están enfrentados (paralelos), entre los cuales se puede originar una onda estacionaria por reflexión directa iterada si el largo del resonador  $l_r$  equivale al múltiplo entero  $m$  de la mitad de la longitud de onda, o sea;

$$l_r = m \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot n_k} \quad \text{Ecuación 2. 33}$$

donde:  $n_k$  es el índice de refracción del cristal. (ver figura 2.31)

La onda estacionaria puede ser generada también por el mecanismo de la reflexión total en la superficie de separación cristal aire, eliminando así la necesidad de los espejos.

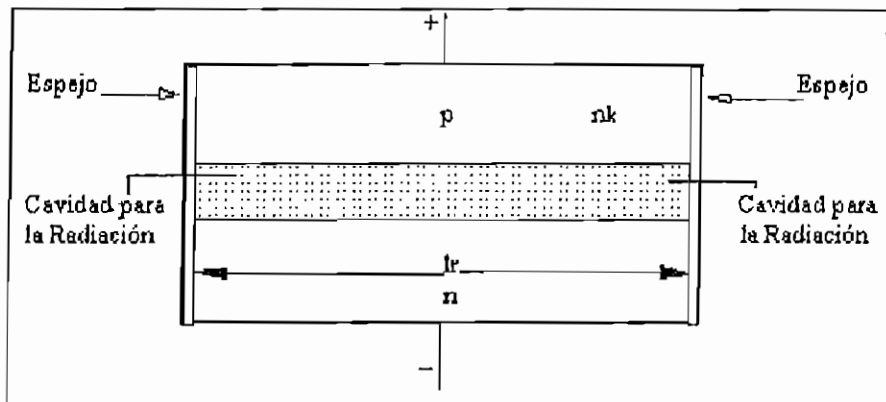


Figura 2. 31 Vista seccionada de la cavidad resonante.

### 2.2.10.2 Funcionamiento del Resonador Óptico

Como se representa en la figura 2.32, la luz emergente del medio amplificador en un determinado sentido es devuelta por el espejo plano hacia el amplificador y vuelve a ser amplificada. Un segundo espejo plano, colocado al final del amplificador y paralelo al primero también devuelve la misma luz hacia éste, de modo que la luz circulante entre los dos espejos sufre una amplificación continua. Esto constituye un amplificador óptico con realimentación donde puede generarse luz coherente y que se denomina oscilador láser. Para que la luz pueda emitirse hacia afuera, los espejos no son reflectantes al 100 %, sino que dejan pasar a su través cierta fracción de la radiación.

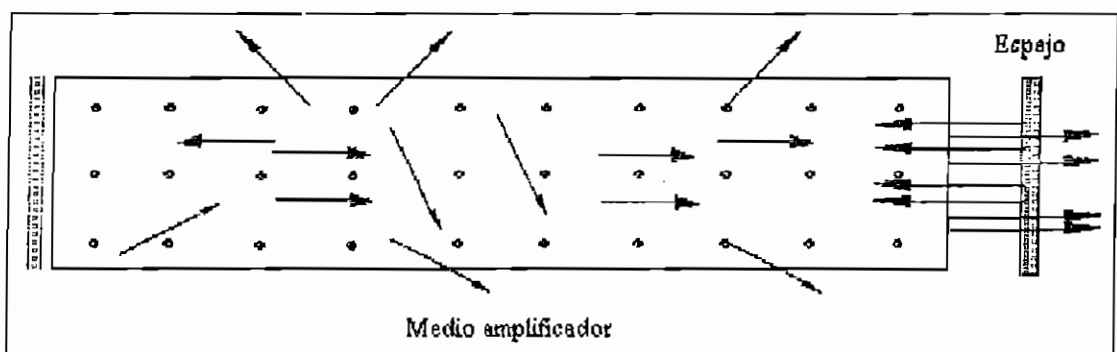


Figura 2. 32 Realimentación con espejos en la cavidad resonante.

### 2.2.10.3 Coherencia

Las ondas de luz generadas de esta manera son espacialmente y temporalmente coherentes, facilitando así una mayor concentración de las ondas del campo lejano. La

intensidad de la luz emitida resulta a la vez ser superior a la de los diodos luminiscentes, debido a la eficiencia de la inyección de los portadores de carga y de su recombinación.

#### 2.2.10.4 Formación de los Niveles

La condición dada para  $I_r$  por la expresión anterior se cumple para numerosas combinaciones de  $m$  y  $\lambda$ ; y por lo tanto la luz emitida por un diodo láser se compone de varias ondas estacionarias de diferentes frecuencias, llamadas nodos.

#### 2.2.10.5 La Corriente de Umbral

En la figura 2.33 se muestra la característica luz corriente de un LD, que consta de dos zonas. En la zona de corriente baja el LD se comporta como un diodo luminiscente, mientras que encima de un límite, llamado la corriente de umbral la emisión crece en forma rápida dando, además, origen a la luz coherente en fase y frecuencia.

La emisión estimulada de luz requiere una alta densidad de portadores de cargas en exceso y de fotones. Sin embargo la corriente de umbral, necesaria para asegurar esta densidad, puede llegar a niveles destructivos para el semiconductor, sino se toman ciertas precauciones para evitar la difusión de cargas y fotones hacia todos los lados del material semiconductor. Por esta razón, los primeros LD de estructura homogénea y de heteroestructura simple no podían funcionar a temperatura ambiente en forma continua, sin correr peligro de ser destruidos por el calor.

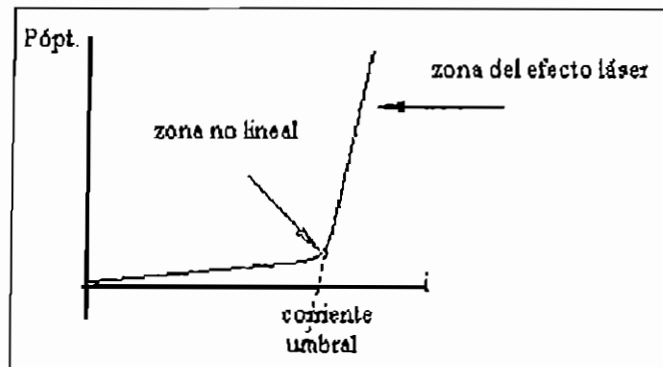


Figura 2.33 Característica potencia/corriente de un LD.

### 2.2.10.6 Clases de Estructuras del LD

Los diodos láser se pueden clasificar, según su estructura, en dos familias que se caracterizan por la clase de limitación lateral de la conducción de ondas, así tenemos:

- a) LD homounión
- b) LD de heteroestructura simple (SHLD)
- c) LD de doble heteroestructura (DHLD)
- d) LD de geometría ranurada:
  - d.1) De ganancia controlada (GLD)
  - d.2) De índice controlado (ILD)

La diferencia entre estos láseres radica en los materiales a usar y principalmente en la forma de su estructura.

A continuación hablaremos de uno de estos tipos de láseres.

#### Estructura de los LD de Doble Heteroestructura

De acuerdo con la figura 2.34 la zona activa del material de GaAs, a veces con una pequeña dosis de Al, para ajustar la longitud de onda, se encuentra entre dos capas p y n de GaAlAs con un contenido de Al más elevado, además de la capa de recubrimiento y de sustrato, que sirven de base para los contactos de alimentación, ambas de GaAs puro.

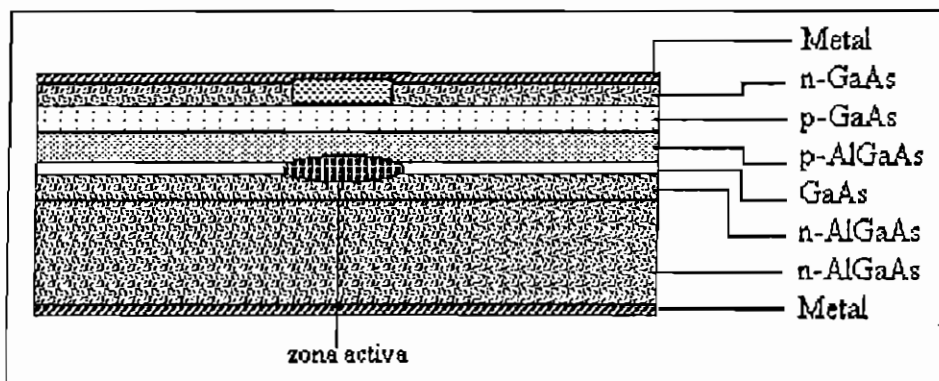


Figura 2.34 Doble Heteroestructura de un LD.

### 2.2.10.7 Efectos del Aluminio en el Ga y As

El contenido del Aluminio en GaAlAs tiene un doble efecto:

**Efecto Óptico:** Rebajar el índice de refracción con respecto a la zona activa, dando origen al fenómeno de la reflexión total como así mismo a las ondas estacionarias que son conducidas dentro de esta zona con el mínimo de pérdidas, como ocurre en fibras ópticas. La zona activa se comporta entonces como una guía óptica.

**Efecto Eléctrico:** Aumentar la separación entre bandas de energía, formando así dos verdaderas barreras de potencial, que obligan a los portadores de cargas (electrones inyectados por el lado n, y huecos por el lado p) a propagarse exclusivamente en la zona activa.

De esta manera pueden ser alcanzadas densidades muy altas de los portadores de cargas, y una elevada amplificación óptica son una corriente de umbral suficientemente baja como para asegurar a los LD un funcionamiento continuo a temperatura del ambiente y sin peligro de destrucción.

#### **2.2.10.8 Característica de Transferencia de entrada/salida del LD**

Las características típicas de potencia óptica en función de la corriente eléctrica se muestran en la figura 2.35, en dos condiciones diferentes de temperatura.

En la figura podemos ver que el funcionamiento del LD consta de dos zonas:

- Con corrientes más pequeñas que las del umbral se comporta como un diodo luminiscente, emitiendo luz incoherente.
- Por encima de la corriente del umbral la emisión es coherente y crece en forma muy rápida, lo que significa ciertas ventajas con respecto a los diodos luminiscentes y a la vez pone de manifiesto su comportamiento crítico en su funcionamiento.

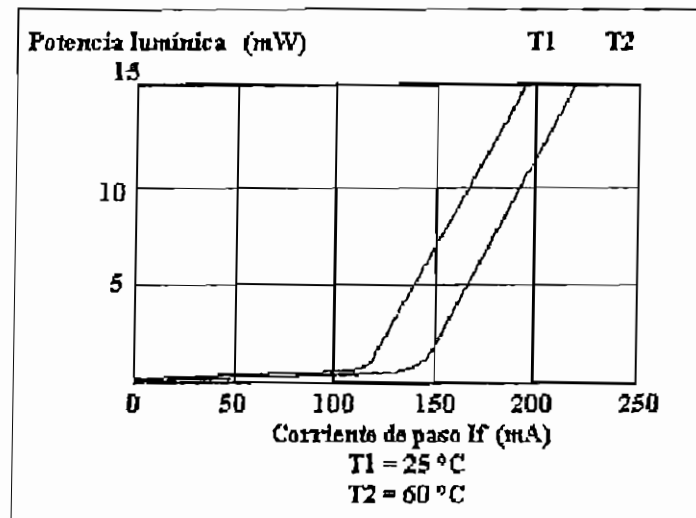


Figura 2. 35 Característica potencia/corriente para diferentes temperaturas.

### 2.2.10.9 Espectro del LD

#### Modos:

La luz emitida por los LD es coherente y compuesta de varios modos de diferentes longitudes de onda  $\lambda$  (líneas de emisión) separados por una diferencia  $\delta\lambda$ . (ver figura 2.36).

Cuya expresión característica está dada por:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n_k \cdot l_r} \quad \text{Ecuación 2. 34}$$

donde:

$n_k$  = índice de refracción del cristal

$l_r$  = longitud de la cavidad resonante

$\delta\lambda$  = distancia entre dos modos de emisión contiguos



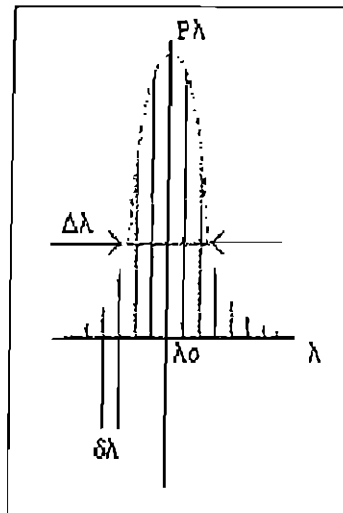


Figura 2. 36 Distribución espectral del LD.

### Envolvente de Gauss:

La envolvente de los modos es muy parecida a la distribución de Gauss con un  $\Delta\lambda = 1$  a  $3$  nm, o sea, mucho más angosta que en los diodos luminiscentes.

### Ancho del Espectro - Ancho de Banda Útil

El ancho del flujo espectral relativamente angosto es de vital importancia para el ancho de banda útil para los sistemas de transmisión óptica. Comparando  $\Delta\lambda$  y  $\delta\lambda$ , el número total en los modos de los LD es relativamente reducido. Sin embargo, lo que se pretende en el futuro, es obtener un sólo modo, para elevar aún más el ancho de banda útil.

### Espectro del LD

El espectro de salida de un LD depende, además, de la estructura del LD y de la temperatura de funcionamiento, principalmente de la potencia de la luz emitida.

### 2.2.11 Presentación visual en Cristales Líquidos (LCD)

Los cristales líquidos son fluidos orgánicos, y el tipo empleado en los LCD's es conocido como cristales líquidos nemáticos (de la palabra griega nematos que quiere decir filiforme, implicando que las moléculas tienen forma de hilos).

El funcionamiento de los LCD's es mostrado en la figura 2.37, en la que el cristal líquido es sellado entre dos superficies de cristal, siendo recubiertas las caras interiores de ambos cristales con un material conductor transparente. La aplicación de una diferencia

de potencial en el rango que va de 1.5 V a 30 V (dependiendo ésta del modo de operación) origina que las propiedades ópticas del cristal líquido se alteren.

Básicamente existen dos tipos utilizables, los presentadores visuales de esparcimiento dinámico (los cuales normalmente dan imágenes en blanco) y los presentadores visuales de efecto de campo (los cuales normalmente dan imágenes en negro). El cristal líquido por sí mismo, no produce iluminación alguna, su visión depende enteramente de la iluminación ambiente.

Cuando un presentador visual del tipo de esparcimiento dinámico es activado, las moléculas se hacen turbulentas y son esparcidoras de luz blanca muy eficientes. Esto origina una imagen o presentación visual blanca, dependiendo la intensidad de la misma de las condiciones de iluminación ambiente. Los presentadores visuales de efecto de campo originan en sus áreas excitadas una absorción de la luz incidente, presentando, como consecuencia, una imagen negra.

Cuando se excitan o energizan ambos tipos de presentadores con una fuente de corriente continua, éstos sufren fenómenos de disociación electrolítica, lo cual acorta la vida del dispositivo. A fin de evitar dichos fenómenos, los cristales son excitados con una alimentación de corriente alterna. Como los LCD's no proporcionan por sí mismos radiación luminosa de salida, la corriente que consumen es del orden de los microamperios, haciéndolos ideales para aplicaciones portátiles tales como lo relojes de muñeca digitales.

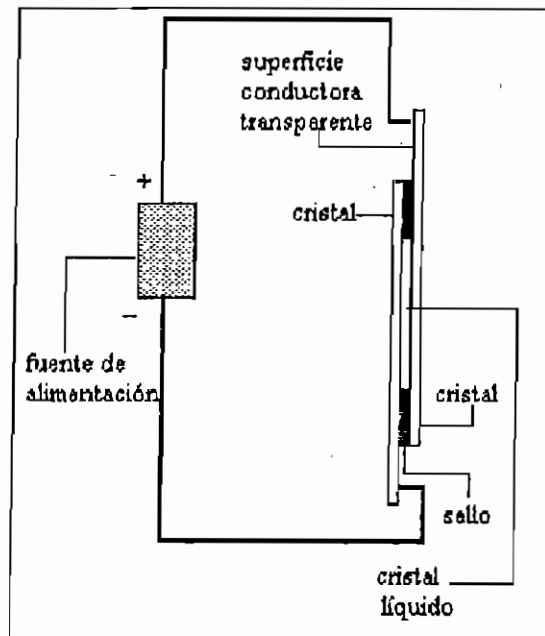


Figura 2. 37 Forma de polarización de un LCD.

## 2.3 RECEPTORES OPTICOS

### 2.3.1 Absorción Óptica

Un fotón irradiado en un semiconductor es absorbido por un electrón el cual, gracias al aumento de energía puede saltar desde la banda de valencia a la banda de conducción. La absorción es la base de los detectores ópticos (fotodiodos).

De acuerdo a lo explicado, las junturas -pn- de los semiconductores pueden ser aprovechados tanto para la excitación de los portadores por inyección, como para la colección de los portadores estimulados ópticamente por fotones, o sea, para la detección de la radiación.

La figura 2.38 nos muestra la estructura esquemática de un fotodiodo de silicio planar con una transición PN abrupta. Entre la región P+ y N se establece una zona de carga espacial (RLZ), que es una zona de campo libre de portadores móviles debida a las diferentes concentraciones de portadores que con una transición abrupta P+N solamente alcanza hasta la región N.

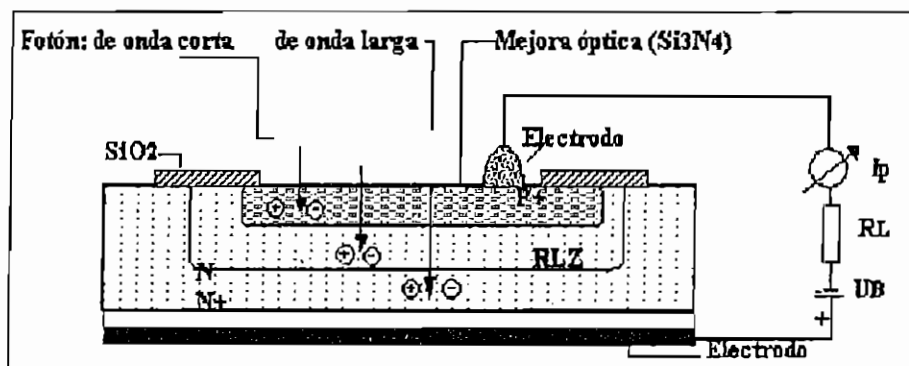


Figura 2.38 Absorción óptica en un fotodiodo.

En la figura 2.39 podemos ver la simbología y la polarización de un fotodiodo.

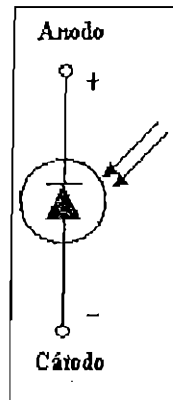


Figura 2.35 Símbolo y polarización de un fotodiodo.

### 2.3.2 Generación de portadores de carga en un Fotodiodo

Para la anchura de la RLZ (zona de carga espacial) se aplica la ecuación:

$$w \approx \sqrt{\frac{(U_D + U)}{n_0}} \quad \text{Ecuación 2.35}$$

donde:

$U_D$  = es la tensión de difusión,

$U$  = es la tensión externa y

$n_0$  = es la concentración de donadores en el lado N.

Para la capacidad de la capa de corte o bloqueo  $C_i \sim 1/w$ , tomando  $w$  de la ecuación anterior se obtiene la ecuación:

$$C_i \approx \sqrt{\frac{n_0}{U_D + U}} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

Si en el diodo penetran fotones con una energía  $hf \geq E_g$  entonces se producen a ambos lados de la transición PN pares de electrón-hueco. La diferencia de energía ( $hf - E_g$ ) se disipa en forma de calor en la redícula. El campo eléctrico en la zona de carga espacial (RLZ) repele a los portadores mayoritarios y arrastra a los portadores minoritarios hacia el otro lado (por lo tanto huecos desde el lado N hacia el lado P y a la inversa electrones del lado P hacia el lado N). De esta manera tiene lugar una separación de los pares portadores de carga y fluye una fotocorriente a través de un circuito externo sin una

tensión adicional (fenómeno fotovoltaico). Los portadores que se originan en la RLZ son absorbidos inmediatamente por el campo dominante allí. Los portadores procedentes de las demás zonas primeramente tienen que difundirse hacia la zona RLZ para ser separados, en el caso de que se recombinasen antes se perderían para la fotocorriente. La fotocorriente  $I_p$  se compone de una corriente de deriva  $I_{Dif}$  de la RLZ y de una corriente de difusión  $I_{Dif}$  procedente de las demás zonas.

Para el caso de que la zona P+ sea mucho más delgada que la profundidad de la penetración  $1/\alpha_\lambda$  ( $\alpha_\lambda$  es el coeficiente de absorción) de la radiación, puede desprejarse la fotocorriente procedente de la zona p y deducirse para la fotocorriente  $I_p$  la ecuación:

$$I_p = I_e \phi_0 \times \left[ 1 - \frac{e - \alpha_\lambda w}{1 + \alpha_\lambda L_p} \right] \quad \text{Ecuación 2.37}$$

donde:

$L_p$  = es la longitud de difusión de los huecos en la región N,

$e$  = la carga elemental,

$\phi_0$  = el flujo de radiación.

El coeficiente de absorción  $\alpha_\lambda$  es la única magnitud de la ecuación que depende de la longitud de onda. Ella determina principalmente el transcurso espectral de la fotosensibilidad del diodo. La anchura de carga espacial  $w$  depende según la ecuación 2.35 de la tensión y del dopado, que también influye sobre  $L_p$  además de la calidad del cristal. Con valores elevados de  $w$  y/o  $L_p$ , se obtiene una elevada sensibilidad.

### 2.3.3 Curvas características de un Fotodiodo

La figura 2.40 nos muestra la curva característica del campo de un fotodiodo. La curva está dividida en funcionamiento como fotodiodo (con tensión de polarización) y funcionamiento elemental (sin tensión de polarización). En el funcionamiento elemental el diodo actúa como un generador de intensidad, que convierte la energía de radiación en eléctrica. Al tomar el fotodiodo como fuente de intensidad con la fotocorriente  $I_p$  y conectar en paralelo con la resistencia de carga  $R_{LE}$  un diodo con la misma polaridad (circuito equivalente ideal), se puede formular la interdependencia entre la corriente y la tensión en la ecuación :

$$I = I_s \left[ e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right] - I_p \quad \text{Ecuación 2.38}$$

donde:

$I_p$  = es la fotocorriente,

$I_s$  = la corriente de saturación,

$U$  = la tensión entre contacto P y N,

$U_T$  = el equivalente de tensión de la temperatura y

$n$  = el factor diodo.

Con  $I_p = 0$  se reduce la ecuación anterior a la ecuación del diodo normal y describe la curva característica en la obscuridad ( $E_v=0$ ). En el caso de iluminación la curva característica se desplaza hacia abajo en correspondencia con la intensidad de iluminación. Para  $I=0$  ( $R_{LE} \rightarrow \infty$ ) se obtiene para la tensión en vacío la ecuación:

$$U_L = nU_T \ln \left[ 1 + \frac{I_p}{I_s} \right] \quad \text{Ecuación 2.39}$$

y para  $U=0$  ( $R_{LE}=0$ ) se obtiene la intensidad en cortocircuito  $I_k=-I_p$ .

Entre la intensidad de iluminación  $E_v$  y la fotocorriente  $I_p$  existe en función del tipo de diodo una interdependencia lineal de varias potencias decimales (8 y más). Contrariamente entre la tensión en circuito abierto  $U_L$  y la intensidad de iluminación  $E_v$  existe una interdependencia logarítmica debido a  $I_p \sim E_v$  e  $I_p \gg I_s$ .

La intensidad  $I_f$  perteneciente a la tensión en circuito abierto  $U_L$  es igual a la fotocorriente inculcada. En funcionamiento como diodo la fotocorriente con uno u otro tipo de diodo puede variar íntimamente con la tensión aplicada, lo que se explica por la dependencia de la tensión de la RLZ. La corriente de oscuridad (primer término en la ecuación 2.38) adquiere importancia en los fotodiodos de silicio solamente con intensidades de iluminación extremadamente bajas (en el margen de los mililux).

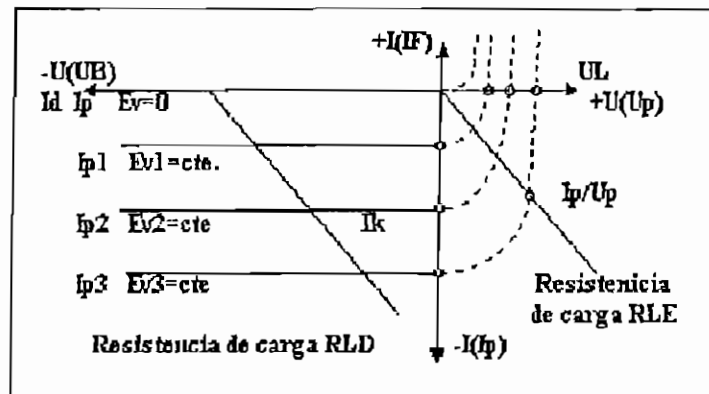


Figura 2. 40 Curvas características de un fotodiodo.

El espaciamiento casi igual entre las curvas para el mismo incremento en la iluminación (o irradiancia) revela que la corriente inversa y la iluminación se relacionan en forma muy cercana a la lineal. En la figura 2.41 aparece una gráfica de estas dos cantidades para mostrar su relación lineal respecto a un voltaje fijo.

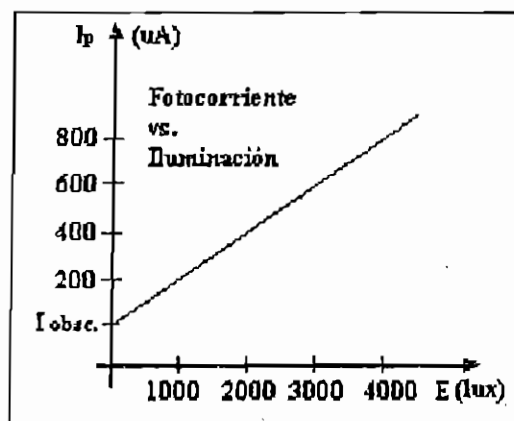


Figura 2. 41 Característica de un fotodiodo.

En la figura 2.42 podemos observar el arreglo básico para la polarización de un fotodiodo.

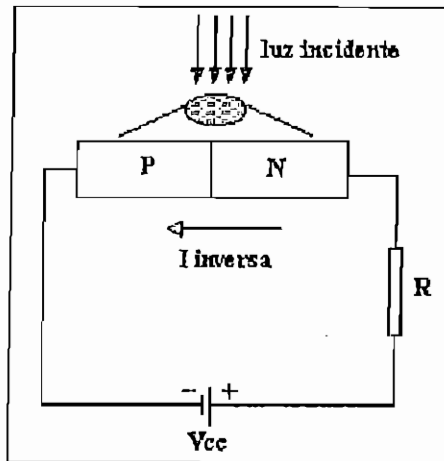


Figura 2. 42 Arreglo básico de polarización de un fotodiodo.

### 2.3.4 Clases de Fotodiodos

#### 2.3.4.1 Fotodiodo PN

Los fotodiodos se pueden adaptar de forma óptima al objetivo de aplicación respectivo mediante la elección del funcionamiento y la estructura apropiada interna. En el fotodiodo PN se absorbe la radiación que normalmente incide perpendicularmente a la zona P+ debido a la estrecha zona de carga espacial (RLZ) en el eje principal en la región cuasineutral P y N; por lo que la fotocorriente se compone principalmente de una corriente de difusión. Puesto que la difusión de los portadores avanza relativamente lenta los diodos PN se utilizan frecuentemente allí donde lo que menos importa es una velocidad elevada en su respuesta a la irradiancia incidente. Un electrón necesita para difundirse a través de una capa P de 5  $\mu\text{m}$  de espesor; 3 ns; y un hueco para el mismo trayecto en la región N 15 ns, por lo que se encuentran diodos Si-PN en fotómetros que aún con la luz de las estrellas funcionan correctamente. Esto presupone una corriente de oscuridad menor aproximadamente  $10^{-11}$  A/mm<sup>2</sup>. Las células solares pertenecen así mismo al grupo de los diodos PN. (ver figura 2.43)

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.2.



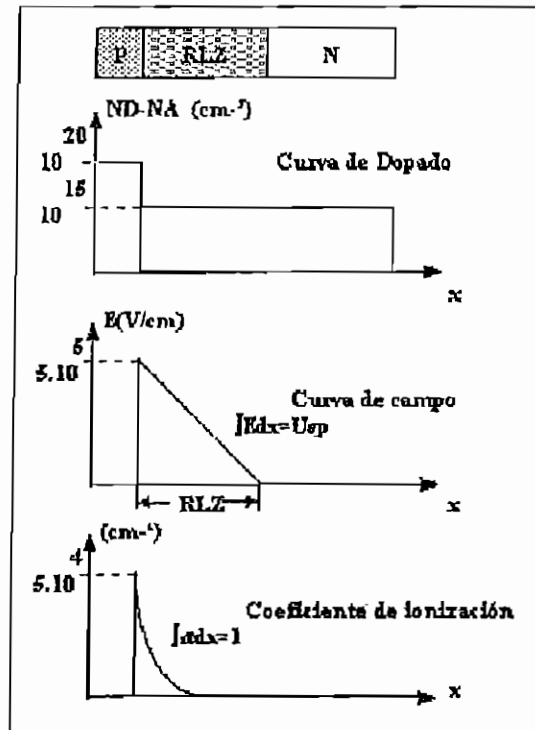


Figura 2. 43 Característica de un fotodiodo PN.

### 2.3.4.2 Fotodiodo PIN

En el caso de los fotodiodos PIN y contrariamente a lo que sucede de con los diodos PN la mayor cantidad de luz se absorbe en la zona RLZ. Se utilizan principalmente allí donde se trata de velocidades elevadas. Para que se pueda obtener una gran RLZ y según la ecuación 2.36 habrá que aplicar en lo posible material semiconductor intrínseco (Intinsic I) (principalmente con débil dotación N o P) en la que por una parte se difunde una zona P+ y por otra parte una zona N+. Se obtiene una estructura P+IN+ (estructura sandwich). Debido a la gran zona de carga espacial RLZ del diodo PIN se hace pequeña la capacidad de corte  $C_i$  según la ecuación 2.37 . Se trabaja con valores de  $C_i$  entre algunos picofaradios hasta algunas décimas de picofaradio. El producto de  $C_i$  y  $R_L$  (resistencia de carga) da como resultado la constante de tiempo del circuito de medida.

Para obtener diodos PIN rápidos se aumenta la tensión tanto como sea necesario para que los portadores deriven con la velocidad de saturación  $v_{sat}$  a través de la RLZ. En el silicio y en el germanio se alcanza la velocidad de saturación  $v_{sat}$  de  $5 \cdot 10^6$  hasta  $1 \cdot 10^7$  cm/s con campos de aproximadamente 100 ps para derivar a través de una zona de 10 um de espesor, lo que corresponde a una frecuencia límite de aproximadamente 3 GHz. (ver figura 2.44)

Nota.- Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.9.

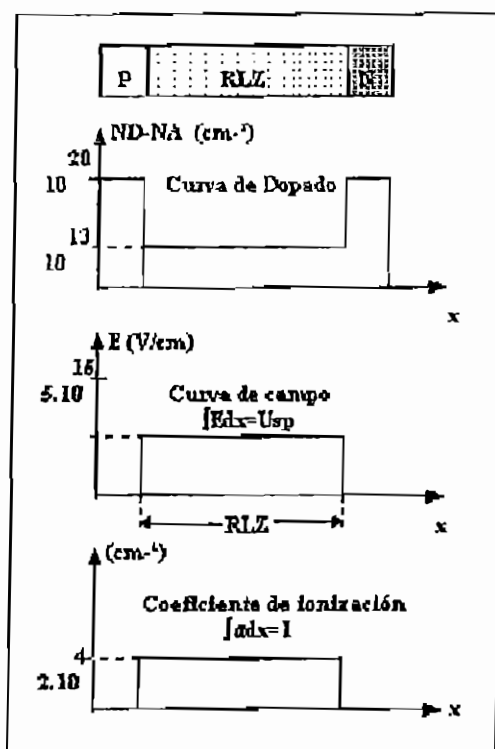


Figura 2. 44 Características de un fotodiodo PIN.

### 2.3.4.3 Fotodiodo APD (Avalanche Photodiode- Fotodiodo Avalancha)

Llamado fotodiodo avalancha, el principio físico de este tipo de diodo se basa en el caso de que se aumente la tensión de funcionamiento de un fotodiodo hasta aproximadamente la tensión de ruptura (avalancha) los portadores generados fotoeléctricamente reciben en la zona de carga espacial RLZ una energía tan elevada que producen nuevos portadores mediante ionizaciones por colisión, originándose una amplificación a modo de avalancha de la fotocorriente primaria. Por principio cualquier fotodiodo podría funcionar como fotodiodo avalancha si cumplierse con las elevadas exigencias del comportamiento avalancha. Con impulsos ópticos breves la ganancia de avalancha está limitada por el producto  $M \cdot B$  de la ganancia de intensidad por la anchura de banda, que es inversamente proporcional a la anchura de la zona de ionización. Con esta anchura se asocia también el tiempo sin colisión  $\tau$  entre dos colisiones, es decir, tenemos la ecuación:

$$M \cdot B = \frac{1}{2 \pi \tau} \qquad \text{Ecuación 2. 40}$$

donde:

$M$  = de la ganancia de intensidad

$B$  = ancho de banda

$\tau$  = tiempo sin colisión.

Para  $\tau = 10^{-12}$ s; el valor del producto es 160 GHz. La exigencia de una zona pequeña de ionización y con ello un breve tiempo sin colisión  $\tau$  y simultáneamente una fotocorriente primaria elevada se cumple ópticamente por el denominado diodo APD; éste se diferencia del diodo PIN por una capa N adicional en conexión con la capa P+. El espesor y el dopado de esta capa se ha dimensionado de tal forma que suceda en ella solamente ionización por colisión.

En comparación con ello el diodo PIN tiene también una región estrecha de ionización, pero sin embargo es demasiado lento. En el caso de los diodos PIN muy rápidos la zona de ionización se extiende nuevamente a través de toda la zona I por lo que suministra un producto pequeño de  $M \cdot B$ . El diodo avalancha reúne junto con la región estrecha de ionización del diodo PN la acumulación rápida de portadores del diodo PIN. (ver figura 2.45)

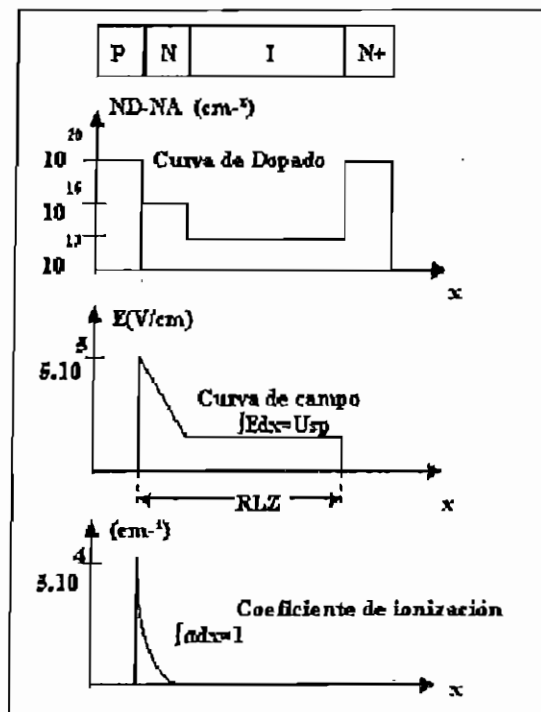


Figura 2. 45 Características de un fotodiodo APD.

### 2.3.5 Fototransistor

Por principio un fototransistor se corresponde con un fotodiodo (colector-base-diodo) conectándole posteriormente un transistor como amplificador. El fototransistor es el componente optoelectrónico integrado más sencillo. La figura 2.46 nos muestra la ejecución práctica de un fototransistor bipolar (sección y alzado) con emisor ( $N^+$ ), base (P) y colector (N); éste último está dividido la mayoría de las veces en una región de bajo dopado N y una región de elevado dopado  $N^+$ . Puesto que la longitud de difusión  $L_p$  de los huecos en la región  $N^+$  es pequeña motivada por el alto dopado, solamente la región P y N suministran el mayor aporte a la fotocorriente  $I_{CB}$  primaria del diodo-base-colector. Lo que también explica la mínima fotosensibilidad de los transistores epitaxiales en el margen de las longitudes de onda largas en comparación con lo fotodiodos. Una gran parte de la radiación de onda larga se absorbe en la región  $N^+$ , puesto que la región N debido a la exigencia de una pequeña resistencia de las pistas está conformada la mayoría de las veces en forma muy delgada (10 a 20  $\mu m$ ).

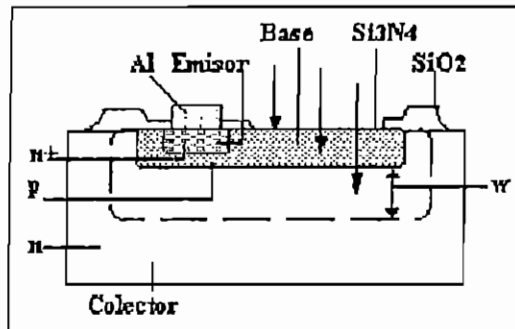


Figura 2. 46 Sección lateral de un fototransistor.

La figura 2.47 nos muestra una vista alzada del transistor con una base de gran superficie, en la que la conexión de emisor y también la conexión de base tienen que efectuarse lateralmente, obteniéndose con ello una sensibilidad superficial lo más uniforme posible.

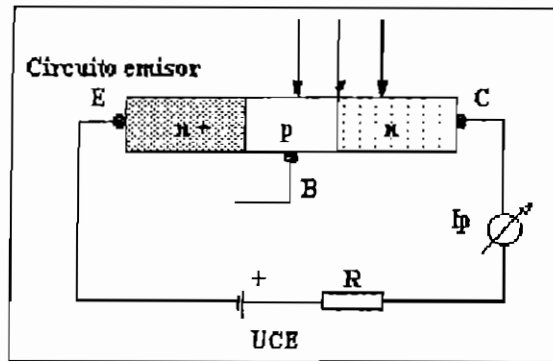


Figura 2. 47 Sección superior de un fototransistor.

La figura 2.48 nos muestra el símbolo de un fototransistor y su polarización. En la figura 2.49 podemos ver las curvas características de un fototransistor.

La ganancia de los fototransistores está normalmente entre 100 y 1000. Las desviaciones de la ganancia de la linealidad y por lo tanto la interdependencia lineal entre la intensidad de iluminación y fotocorriente son del orden de cuatro potencias decimales de la fotocorriente  $I_p$  (desde algunos 100 nA hasta algunos mA) menos del 20%, la mayoría de las veces por debajo del 10%. En comportamiento dinámico los fototransistores son más desfavorables que los fotodiodos puesto que a los procesos de carga y acumulación de estos últimos hay que añadir todavía el retardo debido al mecanismo de amplificación (efecto Miller). En el caso del transistor al tiempo de subida  $t_a$  y de bajada  $t_f$  hay que añadirle todavía el tiempo de retardo  $t_d$ , es decir, el tiempo que transcurre hasta que la fotocorriente después de la conexión de un impulso óptico rectangular haya alcanzado el 10 % de su valor final. Para los tiempos de subida o bien de bajada de un fototransistor es válida la ecuación :

$$t_{a,f} = \sqrt{\left(\frac{1}{2f_T}\right)^2 + a(RC_{CB}V)^2} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

donde:

$f_T$  = es la frecuencia de tránsito.

R = la resistencia de carga.

$C_{CB}$  = la capacidad base-colector.

V = la ganancia

a = una constante cuyo valor está situado entre 4 y 5.

Los tiempos de subida y de bajada de los fototransistores usuales van desde 1 hasta 30  $\mu$ s con una resistencia de carga de  $1k\Omega$ .

Por lo que son especialmente apropiados para su aplicación en el margen de frecuencias de hasta unos 100 kHz, que es suficiente para aplicaciones importantes, como barreras de luz, lectoras de cinta perforada o tarjetas perforadas.

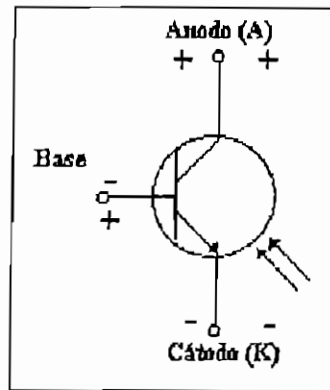


Figura 2. 48 Símbolo del fototransistor.

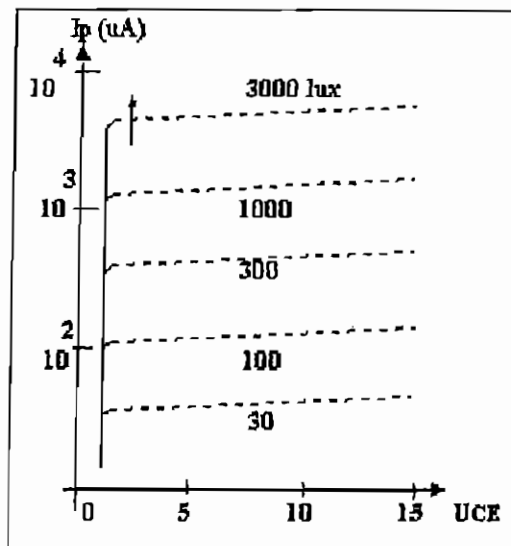


Figura 2. 49 Curvas características del fototransistor.

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.3.

Algunas casas fabricantes dan una curva característica entre la corriente de base y la iluminación incidente, como vemos en la figura 2.50 la relación entre la corriente de base

y la iluminación es exponencial, es decir, existe un aumento exponencial en la corriente de base con la creciente iluminación incidente.

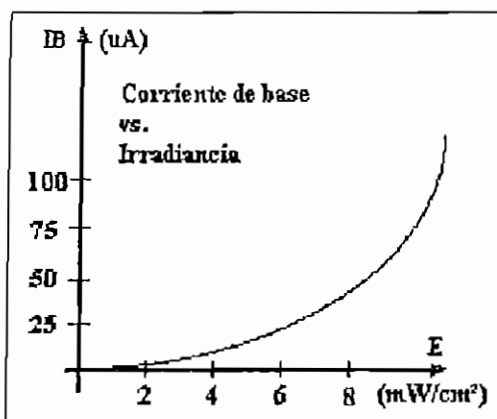


Figura 2. 50 Corriente de base vs. Iluminación.

Un circuito de polarización característico de los fototransistores lo observamos en la figura 2.51.

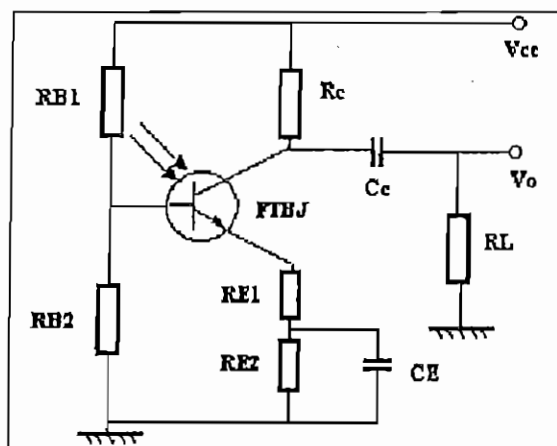


Figura 2. 51 Circuito de polarización de un fototransistor.

### 2.3.6 Célula Solar

Llamadas también células fotovoltaicas o fotoceldas. Cualquier fotodiodo en funcionamiento elemental actúa como un generador que convierte energía solar en eléctrica. Los diodos que posibilitan esta conversión con el máximo rendimiento posible se les denomina células solares. Los representantes más importantes son las células solares Si-PN. Hasta el momento fueron utilizadas preferentemente como fuentes de alimentación en viajes espaciales, sin embargo de nuevo están adquiriendo gran

importancia en aplicaciones terrestres. La figura 2.52 nos muestra una célula solar tal y como se utiliza en el espacio. Su parámetro más importante es el rendimiento, es decir, el cociente entre la potencia óptica y una adaptación óptima y la energía solar total radiada.

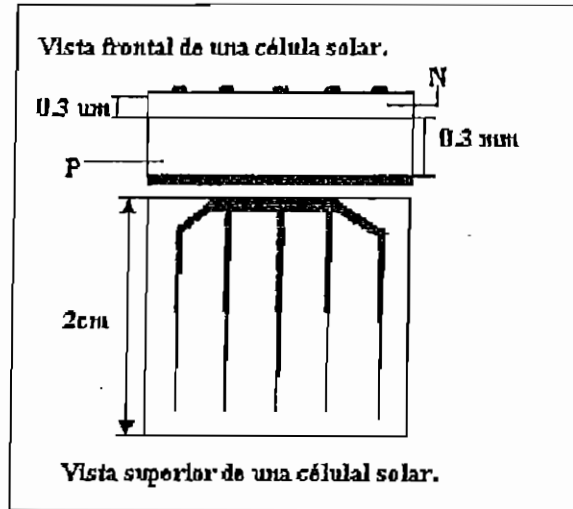


Figura 2. 52 Sección lateral de una célula solar.

Cuando se efectúa el cálculo del rendimiento hay que considerar el transcurso espectral de la radiación solar, y por lo tanto la constante solar es diferente en cada lugar.

Fuera de la atmósfera terrestre (AMO Air Mass Zero) la constante solar tiene el valor de  $135 \text{ mW/cm}^2$ , con un espesor atmosférico simple (AM1) al nivel del mar (con una situación solar perpendicular) la constante solar es  $\approx 106 \text{ mW/cm}^2$  y con un espesor atmosférico doble la constante solar es aproximadamente igual a  $88 \text{ mW/cm}^2$ . Debido a la radiación solar la tierra recibe permanentemente una potencia de  $10^{17} \text{ W}$ , lo que a través de un año corresponde a una cantidad energética de  $10E^{12} \text{ GWh}$  (siendo el consumo de energía mundial alrededor de  $5 \cdot 10^7 \text{ GWh}$ ). Ver figura 2.53.



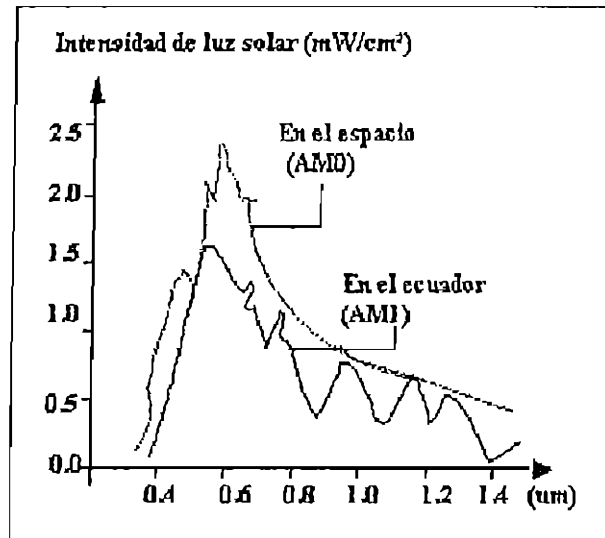


Figura 2. 53 Intensidad de luz solar en función de λ.

En la figura 2.54 se ha reproducido una curva característica típica de tensión corriente de una célula solar Si-PN con una radiación de AMO. La curva característica está caracterizada por la tensión en circuito abierto  $U_L$ , la intensidad de circuito cerrado  $I_k$  y la potencia máxima extraíble  $N_{m\acute{a}x}$ .

Al cociente  $N_{m\acute{a}x}/(U_L \cdot I_k)$  se le denomina coeficiente de régimen. En el caso de una curva característica rectangular tendría el valor ideal 1; sin embargo en la práctica se obtienen solamente valores de 0.7 a 0.8.

A partir de la ecuación 2.38 para la curva característica tensión-corriente se deduce la ecuación:

$$I = I_s \left[ e^{\frac{1}{nU_T}(U - R_s I)} - 1 \right] + \frac{U}{R_p} - I_p \quad \text{Ecuación 2.42}$$

En donde vemos que la corriente de saturación  $I_s$ , la resistencia en serie  $R_s$  y la resistencia en paralelo  $R_p$  pueden influir sensiblemente el transcurso de la curva característica.

Para el caso ideal en el que  $R_s=0$  y  $R_p \rightarrow \infty$ , y el coeficiente de régimen alcanza un máximo, se aproximará al valor de 1 cuando  $I_s$  sea pequeña y por lo tanto la separación energética o la separación de banda  $E_g$  del semiconductor sea grande.

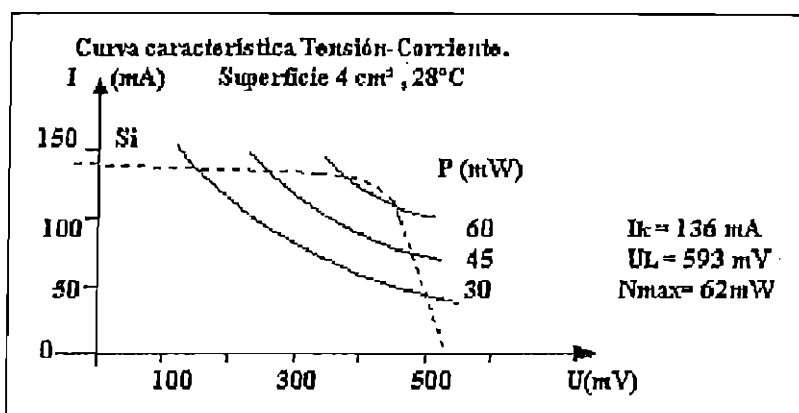


Figura 2. 54 Curva Tensión-Corriente de una fotocelda.

Las consideraciones teóricas demuestran que semiconductores con  $E_g$  de 1.3 hasta 1.5 eV permiten separar el máximo rendimiento. Como podemos ver en la tabla 2.4 los rendimientos más elevados tenemos en las células solares de GaAs con ventana (GaAl)As.

Debido al elevado precio de los semiconductores monocristalinos se están promoviendo amplias indagaciones en semiconductores policristalinos y amorfos que permiten esperar una reducción drástica de costos de las células solares. Con respecto a los trabajos en células solares delgadas de CdS-CuS son los que más han prosperado. Como material con mayores perspectivas hay que nombrar nuevamente el denominado Si con una separación energética de 1.55 eV que se obtienen por deposición sobre un sustrato barato por una descarga gaseosa con silano ( $SiH_4$ ) en forma de película amorfa de algunas micras de espesor.

	Rendimiento en %	Para una $T=20^\circ C$
Material	Valor Teórico	Valor Experimental
Si	22	16
$Cu_2CdS$	18	7
GaAs	26	21
CdTe	25	6

Tabla 2.4 Rendimiento de las células solares.

Una innovación muy reciente en el empleo de las células solares aparece en la figura 2.55. Este circuito es un convertidor de potencia solar en corriente directa. Además podemos ver el símbolo de la célula solar.

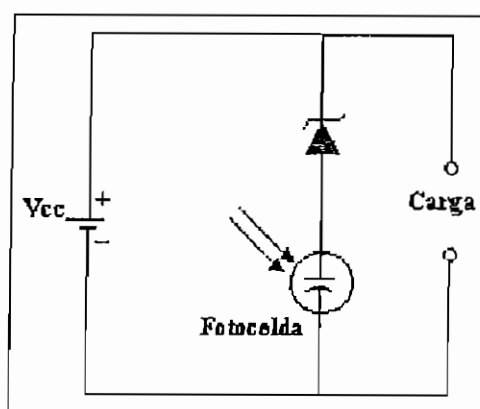


Figura 2. 55 Circuito de aplicación de una fotocelda.

### 2.3.7 Fotoresistencias

Llamadas también células fotoconductoras o celdas fotoconductoras; son detectores de luz a base de semiconductores que no tienen una unión PN. Como sabemos un material semiconductor intrínseco absorbe energía, pares de electrones-huecos se generan espontáneamente en el interior del material. Si la cantidad de energía absorbida aumenta, el número de electrones o huecos libres también aumenta. El efecto en el material es un aumento de la conductividad, o lo que es lo mismo, una disminución en su resistencia eléctrica. En las células fotoconductoras, la fuente de energía es la luz y las radiaciones cercanas al espectro visible.

El material semiconductor de sulfuro de cadmio (CdS) se usa ampliamente en las células fotoconductoras, y tiene una respuesta en el espectro de frecuencias que es prácticamente equiparable a la del ojo humano. Las células de sulfuro de cadmio se emplean, por lo tanto, en aplicaciones donde los humanos podrían normalmente estimar los niveles de iluminación, por ejemplo, en circuitos de control de encendido, circuitos de detección de humos, etc.

El símbolo lo vemos en la figura 2.56 y la estructura de una forma de una fotoresistencia de CdS se muestra en la figura 2.57. El diámetro de esta se encuentra normalmente en el rango que va de 1 a 2.5 cm siendo la parte activa del dispositivo una película de material semiconductor, depositada sobre dos electrodos semejantes a peines, teniendo el total de la estructura una cubierta transparente.

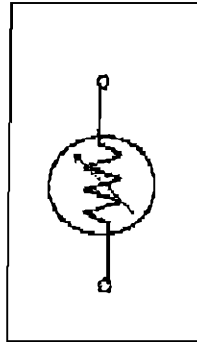


Figura 2.56 Símbolo de una fotoresistencia.

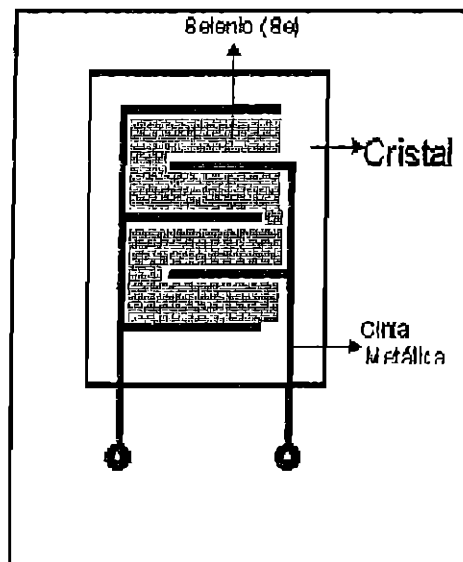


Figura 2.57 Vista seccionada de una fotoresistencia.

En la figura 2.58 se muestra una característica típica de este tipo de fotoresistencia (escala logarítmica).

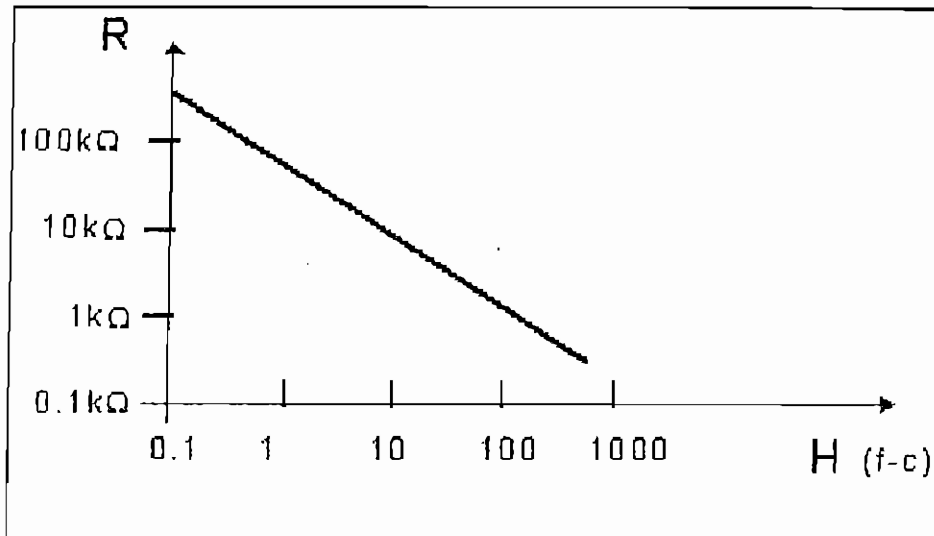


Figura 2. 58 Variación de la resistencia en función de la Iluminación.

En la figura 2.59 podemos ver una aplicación de la fotoresistencia como regulador de voltaje.

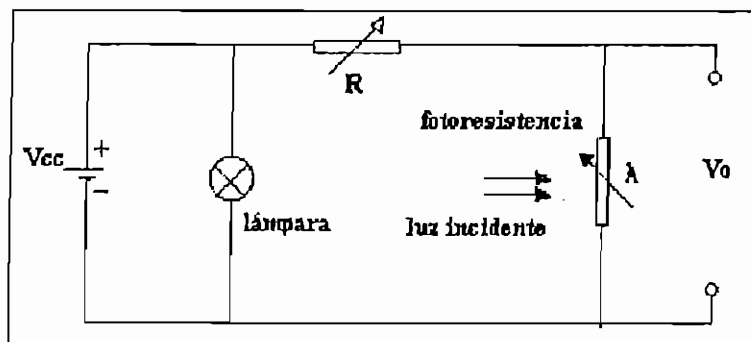


Figura 2. 59 Regulador de voltaje empleando una fotoresistencia.

### 2.3.8 Fototiristores

Los fototiristores se disparan, o sea empiezan a conducir, cuando se permite que la luz incida en la zona de compuerta de dicho dispositivo.

Principalmente se usan los SCR activados por luz; en estos dispositivos también se proporciona el terminal de compuerta, puesto que pueden ser disparados con los métodos típicos del SCR.

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.5 y 3.6.

En la figura 2.60 podemos ver el símbolo y la polarización de este elemento. La figura 2.61 nos muestra otra simbología.

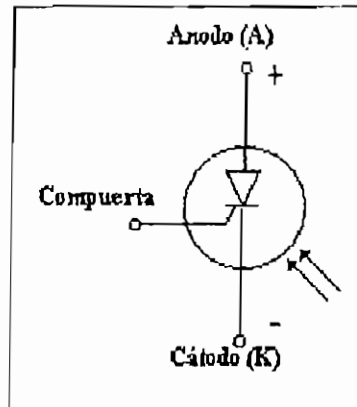


Figura 2.60 Símbolo y polarización de un foto-SCR.

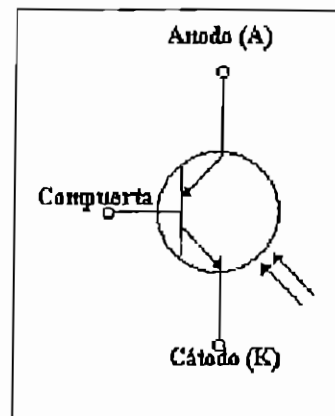


Figura 2. 61 Símbolo de un fototristor.

### 2.3.9 Comportamiento Espectral de los Fotodiodos

El comportamiento espectral de los fotodiodos respecto a frecuencias depende de los siguientes factores:

- RC del diodo
- Fenómenos de difusión
- Retardo de los portadores de cargas
- Reducción de la amplificación a altas frecuencias.

### 2.3.9.1 RC del Fotodiodo

En la figura 2.62 se muestra el circuito equivalente del fotodiodo. El valor típico de la resistencia interna  $R$  es de algunas decenas de ohms y  $C \approx 1$  pF; mientras que la conductancia es despreciable. La frecuencia límite del modelo resulta de la ecuación 2.43 y alcanza hasta 4 GHz con una resistencia de carga  $R_L = 50$  ohms.

$$f_{\text{lm}} = \frac{1}{2\pi C(R + R_L)} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

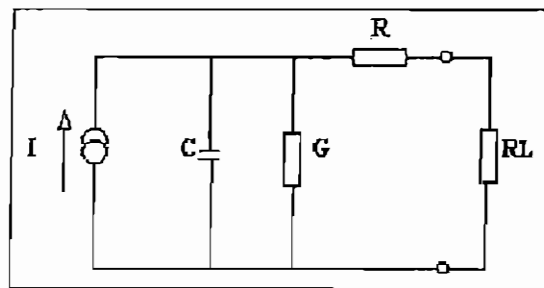


Figura 2.62 Circuito equivalente del fotodiodo.

### 2.3.9.2 Difusión

La difusión de los portadores de cargas generados por el mecanismo fotoeléctrico se manifiesta en las zonas vecinas a la unión. Una absorción excesiva de la luz en estas zonas puede conducir a distorsiones de pulsos recibidos en transmisiones ópticas.

### 2.3.9.3 Retardo de portadores de carga

Con una intensidad de campo de  $10^4$  V/cm la velocidad de propagación de electrones y huecos dentro de la zona de carga espacial puede ser relativamente baja, tal como  $v=10^7$  cm/s.

Si la velocidad de variación de la señal óptica es muy cercana a este valor, la corriente óptica del circuito externo puede sufrir distorsiones de retardo, debidas a la lentitud de reacción del diodo.

Para mejorar la respuesta basta aumentar la intensidad de campo reduciendo el espesor de la unión hasta unos 15 a 25  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.9.4 Reducción de la Amplificación a altas frecuencias

En los diodos tipo avalancha se nota una disminución de la amplificación a altas frecuencias.

Los huecos liberados por ionización por choques se mueven en la zona de multiplicación en sentido opuesto a los electrones formando pares de portadores de carga en pequeña escala. Con este hecho se alarga la permanencia de los pares en la zona de amplificación a altas frecuencias de acuerdo con la ecuación:

$$M_{(f)} = \frac{M}{1 + (2\pi f \cdot M \cdot \tau)^2} \quad \text{Ecuación 2.44}$$

donde:

$M$  = amplificación de corto circuito

$\tau$  = constante de tiempo del diodo

Otra magnitud característica de los fotodiodos se acostumbra a expresar por la ecuación:

$$M \cdot B = M \cdot f_M = \frac{1}{2\pi\tau} \quad \text{Ecuación 2.45}$$

donde:

$B$  = Ancho de banda

$f_M$  = frecuencia límite del fenómeno de multiplicación

El valor típico de  $M \cdot B = 300$  GHz.

De esta manera, el comportamiento de los APD a altas frecuencias es el siguiente:

- Cuando la multiplicación es baja o mediana, predomina la RC, la difusión y el retardo de la unión,
- Mientras que a altas amplificaciones, el producto  $M \cdot B$  es decisivo.

### 2.3.10 Ruido en los Fotodiodos

Además de la sensibilidad y de las características como demodulador, el ruido es un criterio de importancia para evaluar el comportamiento en los fotodiodos.

Al ruido de los fotodiodos contribuyen los siguientes factores:



- El ruido granalla de la corriente óptica.
- El ruido granalla de la corriente de oscuridad.
- El ruido térmico, y
- El ruido adicional de los diodos avalancha.

Este último radica en la naturaleza estadística del proceso de multiplicación y su contribución al ruido se expresa por medio del factor de la ecuación :

$$F = k + M + \left(2 - \frac{1}{M}\right)(1 - k) \quad \text{Ecuación 2.46}$$

donde:

$k$  = es parámetro que varía entre:  $0 \leq k \leq 10$

Ver figura 2.63

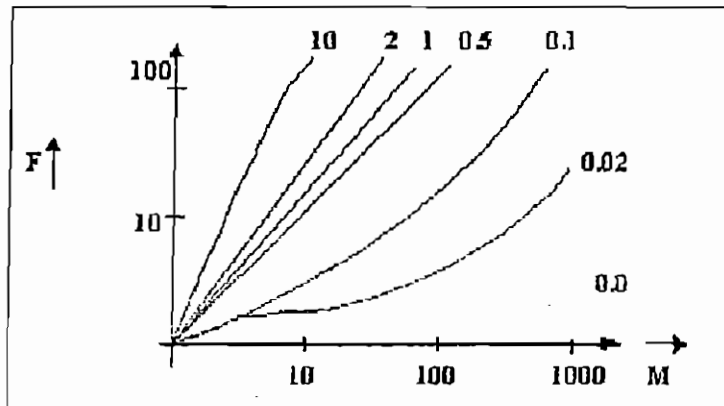


Figura 2.63 Variación del ruido en un fotodiodo.

## 2.4 ACOPLADORES OPTICOS

En general los optoacopladores son dispositivos semiconductores que tienen su propia fuente luminosa (o dispositivo de conmutación), se conocen también como optoaisladores acoplados ópticamente.

Combinan un diodo luminiscente y un fotodetector en un solo empaque, se emplean principalmente para acoplar circuitos de control de baja potencia con cargas o circuitos de potencias mayores, también pueden ser aplicados para unir dos circuitos entre sí. (ver figuras 2.64 y 2.65)

El control de la señal se hace por medio de un haz luminoso, de manera que no hay contacto entre los dos circuitos que se acoplan, ésto permite acoplar circuitos con distinto voltaje.

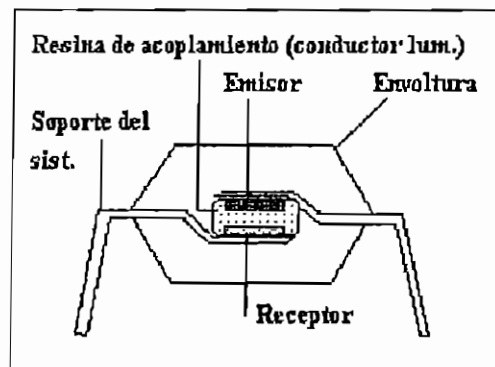


Figura 2. 64 Vista seccionada de un optoacoplador.

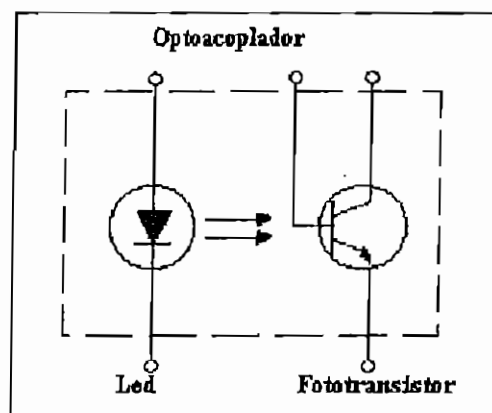


Figura 2. 65 Símbolo de un optoacoplador.

Una ventaja importante de este circuito es su aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida, por lo que se pueden aplicar en circuitos de alto voltaje, entre los que puede existir una diferencia importante de voltios.(ver figura 2.66)

Es decir; el elemento de acoplamiento optoelectrónico facilita la transmisión de señales entre dos circuitos separados físicamente (galvánicamente).

Su amplio margen de frecuencias, puesto que en principio se pueden utilizar desde la corriente continua hasta frecuencias francamente altas; y su pequeño tamaño les permiten sustituir en muchas aplicaciones a los transformadores y a las bobinas de repetición.

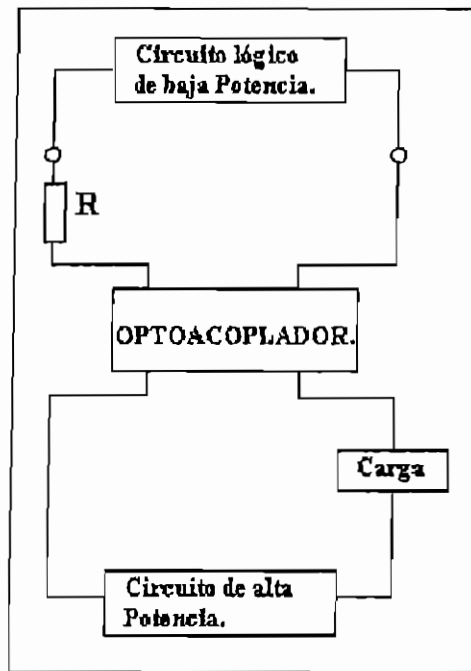


Figura 2. 66 Diagrama de bloques para un aislamiento eléctrico.

#### 2.4.1 Parámetros de los Dispositivos

Al seleccionar un optoaislador, alguno de los parámetros más importantes que deben tenerse en cuenta son su relación de transferencia de corriente, su tiempo de conmutación, el aislamiento de tensión que proporciona su tensión de ruptura de salida y su capacidad de entrada salida. En muchas aplicaciones como las telecomunicaciones, la fiabilidad es de mucha importancia, aunque los dispositivos modernos la tienen muy elevada. No es preciso que el usuario considere ninguno de los puntos de diseño óptico, ya que los optoaisladores se suministran como unidades selladas y sólo es preciso que el fabricante especifique los parámetros eléctricos.

### 2.4.1.1 Relación de Transferencia de Corriente

La relación de transferencia de corriente es la relación entre la corriente de salida y la de entrada bajo unas condiciones especificadas y, normalmente se expresa en forma de tanto por ciento. Esta relación varía ampliamente con la corriente de entrada y con la temperatura. Por ejemplo, un dispositivo con una relación de transferencia de corriente del 100% con una corriente de entrada de 100 mA, puede tener una relación de transferencia de sólo el 25% con una entrada de 1 mA, en tanto son normales las variaciones de relación de transferencia de corriente del orden del 0.5% por grado centígrado. Cuando un dispositivo está funcionando con una corriente de entrada hasta 5 mA, la relación de corriente de transferencia disminuye continuamente por encima de -60 °C.

### 2.4.1.2 Resistencia de Aislamiento

Se trata de la resistencia en corriente continua entre la entrada y la salida del acoplador óptico. Ascende a  $10^{11} \Omega$  como mínimo y por consiguiente es mayor que la que puede lograrse en la mayoría de las aplicaciones ( por ejemplo, montaje en una placa de circuito impreso) .

En la selección y fabricación de las placas de circuito impreso habría de tenerse siempre en cuenta que ya las corrientes de orden de los nA, que pueden aparecer sobre todo en las diferencias de potencial, pueden afectar en determinada circunstancia al funcionamiento de los circuitos. En tales casos, puede ser de utilidad practicar una ranura en la placa o poner a potencial de masa una pista situada entre la entrada y la salida.

### 2.4.1.3 Capacidad de Aislamiento (o Capacidad de Acoplamiento)

El soporte del sistema forma, con el diodo y el fototransistor (DIP-6), una capacidad diferente según sea la forma constructiva. Se sitúa en el intervalo de 0.3 a 2 pF y se mide con las conexiones de entrada y las de salida en cortocircuito. Las variaciones altas de la alta tensión (500V/us) entre la entrada y la salida se transmiten por esa capacidad de acoplamiento y pueden originar perturbaciones en el circuito (sobre todo a través de la base).

#### 2.4.1.4 Tensión de Aislamiento

La tensión de ensayo del aislamiento es la tensión máxima admisible que pueda existir en un instante entre la entrada y la salida del acoplador óptico (por ej.; los picos de tensión inductiva).

La tensión normal de aislamiento indica las tensiones máximas con las que puede cargarse un componente en régimen permanente. La tensión de aislamiento está condicionada por los recorridos de las corrientes superficiales y por los tramos de aire y depende mucho de la forma constructiva.

#### 2.4.1.5 Efecto de Campo (Comportamiento en un campo eléctrico)

En los acopladores ópticos se denomina efecto de campo la lenta variación de los parámetros eléctricos, sobre todo del transistor, por el hecho de permanecer una tensión por largo tiempo (algunos días) entre la entrada y la salida. Este proceso se pone más de manifiesto por altas temperaturas (100°C) y tensión continua alta (1 kV).

Pueden aparecer modificaciones de los parámetros eléctricos del fototransistor de silicio por liberación de portadores de carga.

Las consecuencias pueden ser una modificación de la ganancia, de la intensidad de bloqueo. En este efecto, un factor decisivo es el sentido del campo eléctrico.

#### 2.4.1.6 Conexión de la Base

En los acopladores con cápsula DIP-6 con un fototransistor como receptor, la base se suele sacar afuera. Es posible por lo tanto, incluir el transistor en el circuito con sus funciones normales.

Conectando los terminales del emisor y de la base con una resistencia, se deriva una parte de la corriente colector-base. Con ello se obtienen un aumento de la frecuencia límite a costa de una disminución del factor de acoplamiento, y también una fuerte caída de la intensidad de bloqueo colector-emisor.

Este hecho presenta ventajas, sobre todo a altas temperaturas. Es posible su funcionamiento como acoplador de diodo (tiempos de conmutación más breves, pero menor factor de acoplamiento), mientras que el diodo base-colector se conecta como un fotodiodo normal. El emisor no se conecta en este caso.

### 2.4.1.7 Velocidad de Respuesta

La velocidad de respuesta de un optoaislador depende por completo de las características del sensor de salida. En el caso de un fototransistor, entre la unión de base-emisor del fotodiodo hay una capacidad típica de 25pF lo que, junto con la resistencia de entrada, determina la constante de tiempo. No obstante, no debe olvidarse que la capacidad queda multiplicada por la ganancia del transistor a causa del efecto Miller. Por tanto, si se emplea un transistor de alta ganancia, no sólo se multiplica la capacidad por un valor elevado, sino que la pequeña corriente de entrada también eleva la resistencia de entrada. El empleo de valores elevados de resistencias de carga produce el mismo efecto.

Los tiempos típicos de respuesta indicados en los datos de los optoaisladores suelen especificarse para valores de resistencia de carga muy pequeños (a menudo de 100  $\Omega$ ) que, en la mayoría de circuitos, produce una ganancia inadecuada.

Conectando un resistor entre la base y el emisor del fototransistor de salida, se puede obtener una respuesta más rápida a expensas de la relación de transferencia de corriente. Cuanto menor sea el valor de este resistor, tanto más rápida será la respuesta. Si el emisor se conecta directamente a la base, el dispositivo se emplea como un fotodiodo y la velocidad queda aumentada por la ganancia de corriente del dispositivo.

En la mayoría de los dispositivos que emplean una etapa de salida con fototransistor, la relación de transferencia de corriente está comprendida entre el 5 y 100 %. Cuando en la etapa de salida se emplea un circuito foto-darlington, esta relación es normalmente entre el 50 y 700%, pero cuando el elemento de salida es un sencillo fotodiodo, la relación de transferencia de corriente puede ser del orden del 0.01 %. Los dispositivos que emplean un tiristor o un triac activados por luz no tienen relación de transferencia de corriente.

### 2.4.2 Optoacoplador con Fototransistor de salida

El elemento de acoplamiento se compone de un diodo electroluminiscente como un emisor y de un fototransistor como receptor que están acoplados entre sí mediante una gota de plástico transparente y que están embutidos en una cápsula que desde el punto de vista externo es opaca a la luz. Como emisor se emplean la mayoría de las veces diodos

infrarrojos GaAs, los cuales tienen un rendimiento elevado y muestran un excelente comportamiento al envejecimiento. (ver figura 2.67)

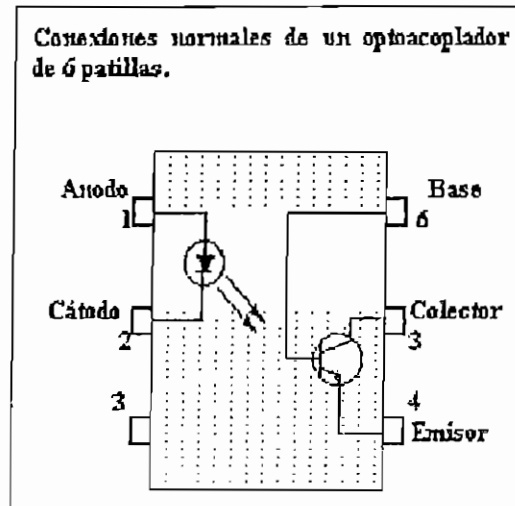


Figura 2. 67 Diagrama de un optoacoplador de 6 patillas.

Con tensiones elevadas y adicionalmente altas temperaturas puede producirse entre el emisor y el receptor una migración de iones en el interior del acoplador que da lugar a una carga de las superficies aislantes, especialmente las del transistor.

Por esta causa pueden modificarse los parámetros eléctricos del transistor. Para evitar esta carga se aplica por ejemplo sobre la superficie del transistor una pantalla iónica transparente (TRIOS).

#### 2.4.2.1 Relación entre la Fotocorriente y la Corriente de adelanto (con fototransistor de salida)

En la figura 2.68 se ha indicado la fotocorriente  $I_p$  como función de la corriente de adelanto  $I_F$  en la que la tensión emisor-colector del fototransistor se varía como parámetro.

La relación de transferencia de corriente  $I_p/I_F$  tienen en el caso indicado como  $I_F=10\text{mA}$  y  $U_{CE}=12\text{ V}$  el valor aproximado de 1. Sin embargo hay también elementos de acoplamiento en los cuales la relación de transferencia de corriente alcanza el valor de 5, es decir, la corriente a través del fototransistor es 5 veces mayor que la corriente a través del diodo emisor.

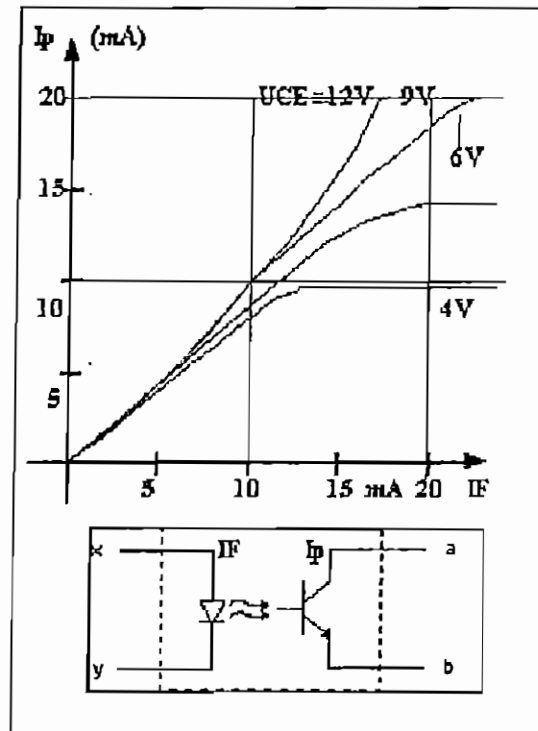


Figura 2. 68 Característica fotocorriente/corriente de un optoacoplador.

### 2.4.3 Salida con Foto-Darlington

La ganancia elevada disponible en un optoaislador con dispositivo de salida foto-Darlington es muy interesante para las aplicaciones de corriente de entradas bajas. No obstante, debe recordarse que tanto la eficiencia del emisor como la ganancia del dispositivo de salida disminuyen considerablemente en los niveles bajos de corriente.

Por tanto, con un transistor pueden obtenerse prestaciones en términos de corriente útil con respecto a las corrientes de fugas que con un Darlington. Sin embargo, Hewlett-Packard fabrica una gama de dispositivos con etapas Darlington de salida diseñados especialmente para su empleo con corrientes de entrada reducidas. En la figura 2.69 tenemos el símbolo de éste elemento.



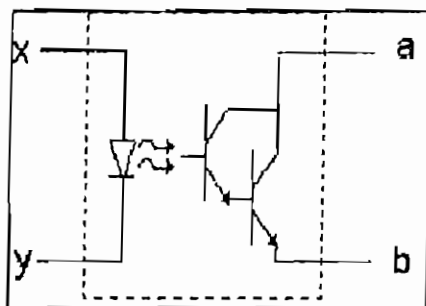


Figura 2. 69 Símbolo.

En estos productos, las relaciones de transferencia de corriente típicas están comprendidas entre el 800 y 1000% con una corriente de entrada de 0.5 mA. Las relaciones de transferencia de corriente de pico de estos dispositivos se obtienen con una corriente de pico aproximada de 1 mA. El fotodiodo empleado es independiente del dispositivo Darlington y, algunos tipos, tienen un resistor conectado entre la base y el emisor del transistor de salida.

Los dispositivos con etapas de salida foto-darlington son muy útiles en aplicaciones con niveles de corriente elevados, en la que los efectos de la corriente de fugas y de la temperatura tienen menos importancia.

#### 2.4.4 Salida con Foto-Tiristor

La cantidad de radiación del emisor de un optoaislador sólo puede producir una corriente que es relativamente pequeña en el circuito de puerta de una etapa de salida con fototiristor. Por tanto, los fototiristores empleados en estas aplicaciones deben ser muy sensibles. La sensibilidad de estos optoaisladores varía con la resistencia externa entre puerta y cátodo  $R_{GK}$ , ya que la fotocorriente necesaria para hacer conductor al tiristor debe ser la que produzca una caída de tensión aproximada a 0.7 V en  $R_{GK}$ .

La corriente que debe circular por el diodo emisor de entrada para disparar los dispositivos 4N 39, 4N 40, H11C3 y H11C6 de General Electric no es mayor de 30 mA cuando la tensión VAK aplicada es de 50 V y  $R_{GK}$  es de 27 k $\Omega$ .

Los tipos H11C1, H11C2, H11C4 y H11C5 son algo más sensibles, con corrientes de disparo de 20 y 11 mA en las mismas condiciones indicadas anteriormente.

El valor de  $R_{GK}$  es un compromiso entre hacer el optoaislador tan sensible como sea posible empleando un valor elevado y reducir el disparo esporádico con impulsos transitorios con un valor reducido. (ver las tres figuras que siguen)

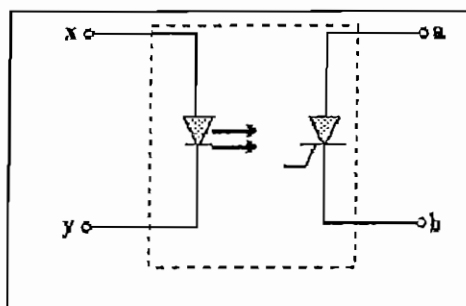


Figura 2. 70 Símbolo. Salida con foto-SCR.

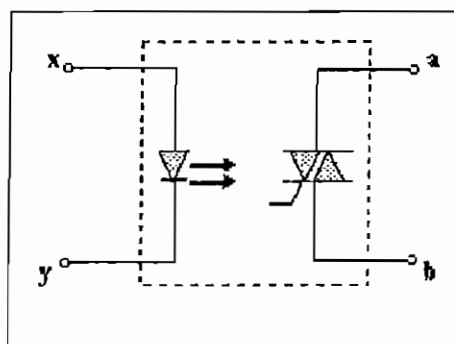


Figura 2. 71 Símbolo. Salida con foto-Triac.

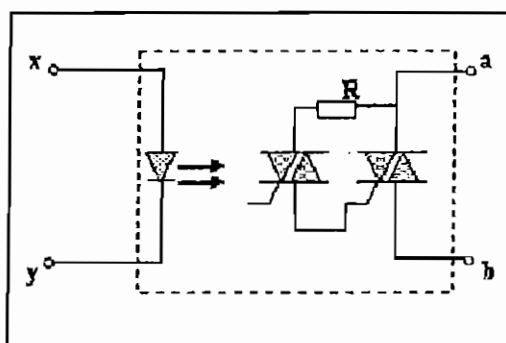


Figura 2. 72 Símbolo. Salida con Foto-TRIAC-TRIAC.

### 2.4.5 Salida Con Foto-FET

Los dispositivos H11F1, H11F2 y H11F3 contienen un emisor de arseniuro de galio y un detector FET bilateral simétrico de silicio. Este dispositivo puede emplearse como un resistor variable a distancia de un margen de variación de menos de  $100 \Omega$  hasta  $300M\Omega$  con una linealidad del 99.9 % y una capacidad en paralelo de menos de 15 pF. También puede emplearse como interruptor analógico de señal.

En la figura 2.73 vemos la simbología de este tipo de optoacoplador.

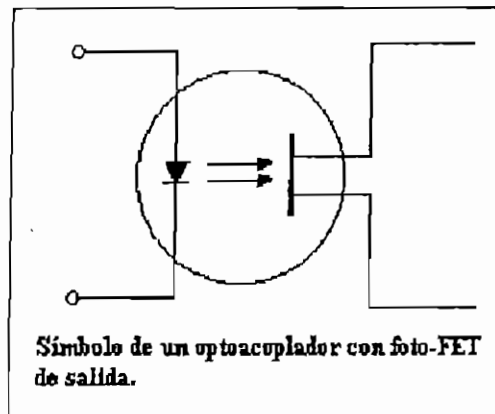


Figura 2. 73 Símbolo.

### 2.4.6 Barrera Óptica para la lectura de una cinta perforada

Una aplicación común del diodo emisor y del fotoreceptor es la barrera óptica en la que emisor y receptor no tienen que estar acoplados en una cápsula. Como ejemplo se puede ver la figura 2.74 una disposición para la lectura de una cinta perforada. La separación del chip emisor (a) y de chip receptor (b) corresponde a las de la perforaciones de la cinta perforada (e) que pasa entre las líneas. Además en este aplicación existe un control visual (c) y un detector de valor umbral (d).

También para esta aplicación se usan como emisores diodos GaAs a causa de su elevado rendimiento y del mínimo envejecimiento.

Para el control se pueden disponer todavía de una línea de seis LED's radiantes en el margen visible, que se controlan en forma correspondiente a la electrónica de evaluación.

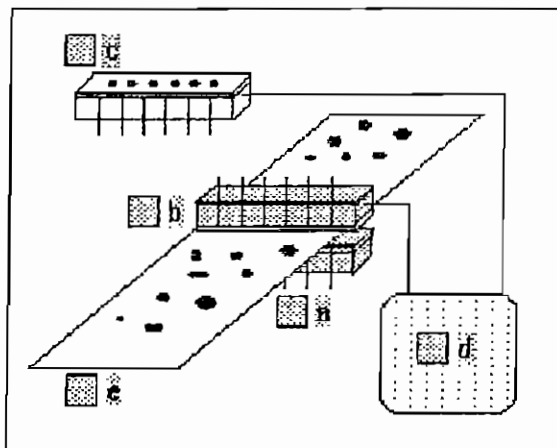


Figura 2. 74 Barrera óptica para la lectura de una cinta perforada.

**Nota.-** Un circuito de aplicación con este elemento lo encuentra en el capítulo III, numeral 3.11.

## 2.5 FIBRAS OPTICAS

### 2.5.1 Reseña Histórica

Desde la más remota antigüedad se ha utilizado la luz para la transmisión de informaciones. Ello ocurría p. ej. en forma de fogatas para señales. Hoy en día se puede encontrar este tipo de transmisión de informaciones en numerosas aplicaciones como por ejemplo el alfabeto de banderas utilizado en la marina, los faros, los semáforos y las luces indicadoras de los tableros de maquinarias. Desde siglos el hombre ha pensado en la construcción de sistemas que le permitieran transmitir mensajes por medio de pulsos luminosos cubriendo grandes distancias.

Así Claude Chappe construyó en Francia, alrededor del año 1790, un sistema de telégrafo óptico que consistía en una cadena de torres con sistemas de señalización móviles. Con este sistema se transmitían informaciones cubriendo unos 200 km en solamente 15 minutos y sólo se dejó de utilizar cuando fue reemplazado por el telégrafo eléctrico.

En el año 1889, el norteamericano Alexander Graham Bell desarrolló el "photophon" con el cual se podían transmitir señales de alta voz con ayuda de la luz. Esta idea sin embargo no encontró aplicaciones prácticas pues las influencias climáticas y la visibilidad alteraban en forma admisible la transmisión.

En 1870 o sea antes del descubrimiento de Bell, el físico inglés Jhon Tyndall señaló una solución del problema demostrando que un chorro de agua era capaz de conducir la luz. Su experimento se basaba en el "Principio de la Reflexión Total" que se utiliza actualmente en los conductores de fibra óptica. Después de los primeros intentos en el campo de modulación de la luz efectuados por Bell y Tyndall, sólo en el año 1934 el norteamericano Norman R. French obtuvo una patente que cubría un sistema telefónico óptico. En la misma describía que las señales de voz eran transmitidas por una red de conductores ópticos (formados por varillas rígidas de vidrio u otro material similar) con un pequeño coeficiente de atenuación para la respectiva longitud de onda de servicio.

La realización práctica de este concepto se logró 25 años más tarde. Primero se encontró una fuente de luz adecuada para ser utilizada como emisor: en el año 1958, los premios Nobel Arthur Schawlow y Charles H. Townes desarrollaron el láser, utilizado con éxito por primera vez por Theodor H. Maiman en 1960.

En 1962 se descubrió que existía la posibilidad de producir un láser con materiales semiconductores. Paralelamente se desarrollaron los elementos receptores: fotodiodos semiconductores.

Quedaba únicamente por encontrar un medio de transmisión adecuado que uniera ambos extremos.

En principio se propusieron conductores circulares huecos y espejados con un complicado sistema de lentes. En Inglaterra, en el año 1966, Charles R. Kao y George A. Hockham sugirieron utilizar fibras de vidrio como conductores. Sin embargo, para utilizar en forma razonable estas fibras de vidrio y cubrir distancias apreciables, debían tener una atenuación máxima del orden de los 20 dB/km contra los aproximadamente 1000 db/km que tenían en el año de 1965.

Ya en los años cincuenta, en la técnica médica se usaban fibras de vidrio para la transmisión directa de imágenes sobre distancias muy cortas.

En 1970, la empresa Corning Glass Works fabricó en los Estados Unidos conductores de fibras ópticas con un perfil escalonado y obtuvo valores de atenuación menores a los 20 dB/km con una longitud de onda de 633 nm. En 1972 se lograron valores de atenuación de 4 dB/km con conductores de fibra óptica de perfil gradual. Hoy en día, el estado de la técnica permite obtener atenuaciones de 0.4 dB/km con longitudes de onda de 1300 nm en conductores de fibra óptica monomodo. Simultáneamente, se mejoran considerablemente la sensibilidad, la potencia y la vida útil de los elementos receptores y transmisores. Así mismo, gracias a una adecuada técnica para los cables, los conectores y los empalmes de los conductores de fibra óptica, se logró introducir sin inconvenientes el nuevo medio de transmisión.

Los primeros conductores de fibra óptica para telefonía se pusieron en funcionamiento en barcos de la armada de los E.E.U.U. en 1973.

El primer sistema de conductores de fibra óptica se ensayó en 1976 en la planta de la Western Electric de Atlanta (E.E.U.U.). Un año después se efectuaron los primeros ensayos de campo: la Bell Systems con una instalación de 2.5 Km en Chicago y la General Telephone, con una de 9km de Long Beach. La primera empresa que suministró

en E.E.U.U. cables de fibras ópticas monomodo a una compañía telefónica (Nueva York 1983) fue la Siecor Corporation, empresa fundada conjuntamente por Siemens y Corning Glass Works.

Desde el año de 1976 Siemens está utilizando en Munich el tramo experimental de 2.1 km para la transmisión de señales telefónicas, de televisión y de vídeo teléfono.

En el año 1977 Siemens instaló en Berlín el primer trayecto de fibra óptica para el Correo Federal Alemán. El CERN, de Ginebra (Suiza), desde 1978 tiene en servicio un cable de conductores de fibra óptica a prueba de radiaciones. A partir de esa época se comenzó a utilizar la nueva tecnología a nivel mundial. Las instalaciones mencionadas precedentemente se hicieron con conductores de fibras multimodo. En el futuro se instalarán principalmente tramos con conductores de fibras ópticas monomodo.

### 2.5.2 Estructura de la Fibra Óptica

La fibra óptica es una fibra delgada que conduce la luz no constituida por un dieléctrico (materia que no tiene conductividad vidrio o plástico). Está compuesta de dos partes básicas, una llamada núcleo (core), por donde la luz se propaga; la otra llamada manto o revestimiento (cladding) que cubre el núcleo.

Físicamente la fibra está constituida por dos cilindros coaxiales de sílice. El interior, llamado núcleo, se construye de elevadísima pureza con el propósito de obtener una atenuación lo menor posible.

El exterior, llamado manto o revestimiento, también de sílice, se construye con requisitos no tan rigurosos como del núcleo. Su misión es aislar el núcleo del medio ambiente, con el propósito de evitar que la propagación del campo electromagnético se vea afectado.

Para lograr la propagación de la luz, el núcleo de la fibra debe poseer un índice de refracción  $N_1$ , mayor que el del manto que lo rodea.

En la figura 2.75 se esquematiza la estructura de la fibra; en ella se observa que dentro de la fibra se distinguen dos regiones con diferentes índices de refracción.

Se dice que la fibra óptica es delgada como un cabello, el diámetro exterior de la cubierta es de 0.1 mm aproximadamente y el diámetro del núcleo es de unos micrometros a una decena de micrometros.

Actualmente los organismos internacionales como la UIT y el IEC han normalizado las características geométricas de la fibra óptica empleada para comunicaciones.

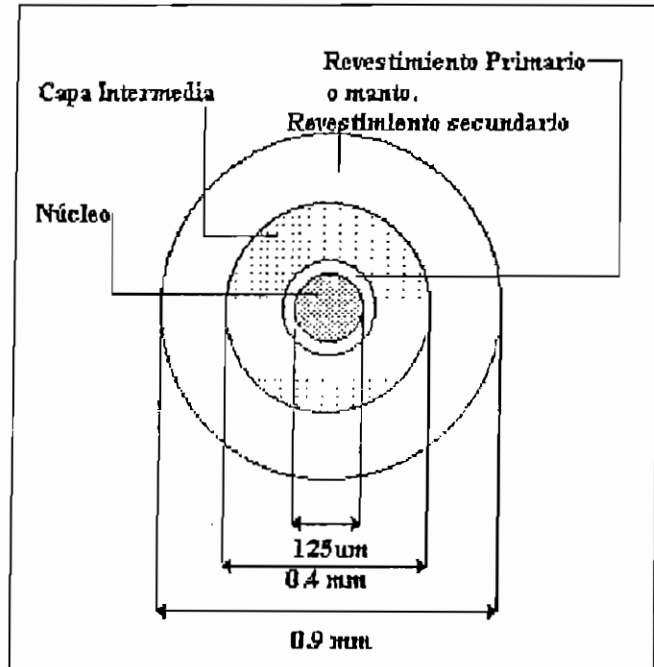


Figura 2. 75 Esquema de una fibra óptica.

### 2.5.3 Construcción de la Fibra Óptica

Cualquiera que sea el tipo de fibra a considerar, los parámetros geométricos que lo caracterizan son los siguientes:

- Diámetro del núcleo, y
- Diámetro del revestimiento.

Estos diámetros, dependiendo de la tecnología de fabricación, arrastran errores diversos. La magnitud de las tolerancias correspondientes se encuentra recogida en la recomendación G.651 del UIT para fibra multimodo y G.652 para las monomodo.

Además, el propio proceso de fabricación introduce defectos en la concentricidad del núcleo y en la circularidad del núcleo y del revestimiento, lo que obliga a definir los siguientes parámetros adicionales:

- Excentricidad,
- No circularidad del núcleo, y
- No circularidad del revestimiento.



**Diámetro del núcleo.-** Promedio de valores máximo y mínimo del núcleo; donde usamos la ecuación:

$$d_N = \frac{1}{2}(d_{Nmax} + d_{Nmin}) \quad \text{Ecuación 2.47}$$

donde:

$d_N$  = el diámetro del núcleo.

$d_{Nmax}$  = el diámetro máximo del núcleo.

$d_{Nmin}$  = el diámetro mínimo del núcleo

**Diámetro del revestimiento.-** Promedio de los valores máximo y mínimo del diámetro del revestimiento, para lo cual usamos la ecuación:

$$d_R = \frac{1}{2}(d_{Rmax} + d_{Rmin}) \quad \text{Ecuación 2.48}$$

donde:

$d_{Rmax}$  = el diámetro máximo del manto o revestimiento.

$d_{Rmin}$  = el diámetro mínimo del manto.

#### **Excentricidad núcleo-revestimiento:**

Se define por la ecuación:

$$C_{NR} = \frac{NR}{d_N} \quad \text{Ecuación 2.49}$$

donde:

$N$  = es el centro geométrico del núcleo

$R$  = es el centro geométrico del revestimiento

#### **No circularidad (elipticidad) del núcleo:**

Se define por la ecuación:

$$N_N = \frac{(d_{Nmax} - d_{Nmin})}{d_N} \quad \text{Ecuación 2.50}$$

#### **No circularidad (elipticidad) del revestimiento:**

Se define por la ecuación:

$$NR = \frac{(d_{Rmax} - d_{Rmin})}{dR} \quad \text{Ecuación 2.51}$$

### 2.5.4 Clasificación de la Fibra Óptica

Las fibras ópticas se clasifican de tres formas:

- Por la distribución del perfil del índice de refracción,
- Por el modo de propagación, y
- Por el material con que se fabrican.

#### ii.5.4.1 Según la distribución del Índice de Refracción

##### Fibra Óptica de Salto de Índice

Fibra óptica de índice escalonado (STEP INDEX TYPE o SI), donde el índice de refracción cambia de forma escalonada entre el núcleo y el manto adoptando la forma de una escalera o ángulo agudo.

Como podemos ver en la figura 2.76 en esta clase de fibras ópticas el índice de refracción del núcleo permanece invariable en toda su sección.

Al ser constante el índice de refracción, la apertura numérica será constante y dada por la ecuación 2.23:

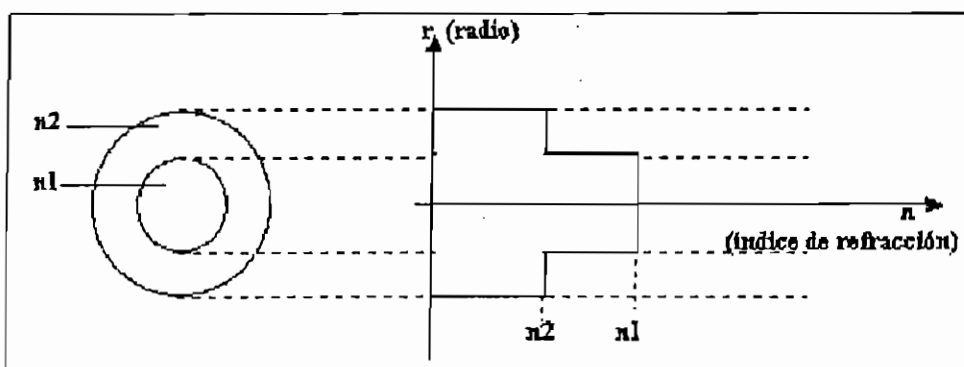


Figura 2. 76 Fibra óptica de salto de índice.

**Fibra Óptica de Índice Gradual**

Fibra óptica de índice gradual (Graded Index Type o GI), donde la distribución del índice de refracción se cambia gradualmente. En este caso el índice de refracción en el núcleo disminuye continuamente a medida que se aleja desde el eje central de la fibra (índice en el núcleo). El índice del revestimiento permanece constante.

En estas fibras con este tipo de perfil de índice las trayectorias de los modos son curvas, en lugar de rectas, como ocurre en la fibras de salto de índice, debido precisamente a la variación del índice (ver figura 2.77). Esta variación ocurre, además, de tal forma que se van produciendo enfoques sucesivos de los rayos en dirección al eje de la fibra.

La función que da la variación de dicho índice en función del radio es de la forma:

$$n_{1(r)} = \begin{cases} n_{1(0)} \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}} & \xrightarrow{\text{con}} 0 \leq r \leq a \\ n_{1(0)} \left[ 1 - 2\Delta \right]^{\frac{1}{2}} & \xrightarrow{\text{con}} r \geq a \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.52}$$

donde:

$\Delta$  = el equivalente a la diferencia relativa de los índices de refracción.

$r$  = la distancia del punto considerado al centro del núcleo

$a$  = el radio del núcleo

$g$  = un parámetro dependiente de las características constructivas de la fibra.

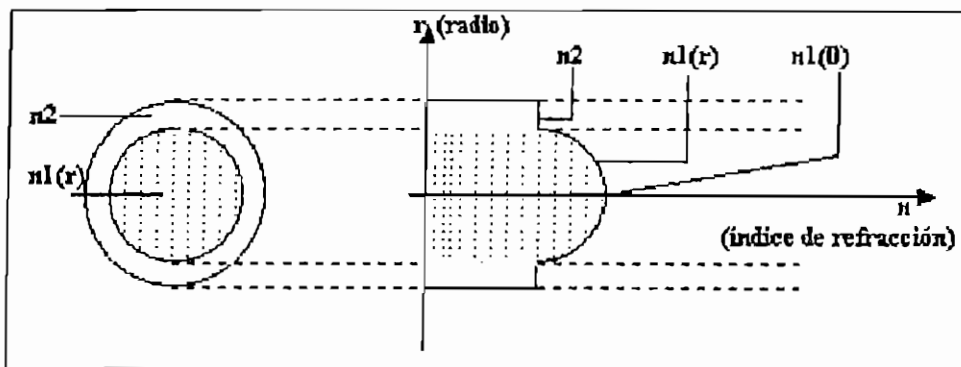


Figura 2. 77 Fibra óptica de índice gradual.

**a) Valores de G.-**

Dependiendo del valor que tome  $g$ , siempre mayor que 1, se tendrán diferentes valores de la función  $n_1(r)$ . El retardo entre modos se puede hacer mínimo optimizando  $g$ . Este valor óptimo depende, en última instancia, de la longitud de onda en que se trabaja y de la composición del núcleo.

Una expresión aproximada del valor óptimo de  $g$ , está dado por la ecuación:

$$g_{optimo} = 2 \times \left[ 1 - \frac{\lambda}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} \right] \quad \text{Ecuación 2.53}$$

donde:

$\lambda$  = longitud de onda a la que se trabaja

$\delta$  = diferencia relativa de los índices de refracción de los dos medios.

Encontrándose habitualmente este valor en torno a 2, por lo que resulta prácticamente un perfil parabólico para  $n_1(r)$ .

El valor extremo de  $g$  es  $\infty$ . En este caso es  $(r/a)^2 = 0$ , por lo que  $n_1(r) = n_1(0)$ , y estamos en el caso de la fibra S.I.

**b) Determinación del parámetro  $\Delta$ .-**

Para su cálculo se impone la condición de contorno; ha saber:

$$\begin{aligned} n_1(r) &= n_2 \quad \text{para } r = a \\ n_1(a) &= n_1(0) * [1 - 2\Delta]^{1/2} = n_2 \end{aligned}$$

De aquí se obtiene la ecuación:

$$\Delta = \frac{n_1(0)^2 - n_2^2}{2n_1(0)^2} \quad \text{Ecuación 2.54}$$

Pero  $\Delta \approx \delta$ ; para valores pequeños de  $\Delta$ .

c) Apertura Numérica de la Fibra G.I. .-

De la ecuación 2.23 se puede obtener la expresión:

$$AN_{GI(r)} = n_{1(0)} \sqrt{2\delta \times \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]} = AN_{SI} \sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]} \quad \text{Ecuación 2.55}$$

2.5.4.2 Según el Modo de Propagación

Se pueden clasificar en:

**Fibra Optica Monomodo o de Modo Simple (Single Mode o SM)**

Se caracteriza porque sólo existe un modo de propagación, su diámetro es de aproximadamente unos 10 um. (ver figura 2.78)

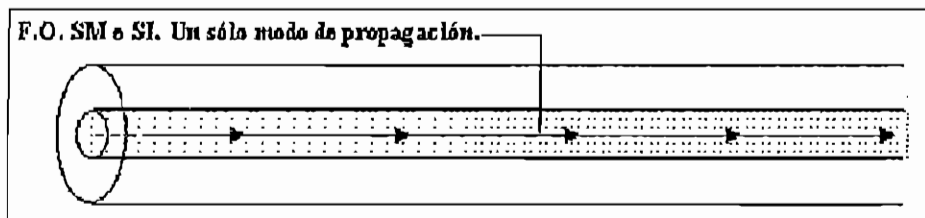


Figura 2. 78 Fibra óptica monomodo.

**Fibra Optica Multimodo (MM)**

Se caracteriza porque existe más de un modo de propagación en esta fibra. (ver figura 2.79)

Dados que las características del tipo SM son pérdidas bajas y banda ancha, éste se utiliza para sistemas de transmisión de larga distancia.

El tipo GI es menos costoso que el tipo SM y es usado para sistemas de transmisión de corta distancia.

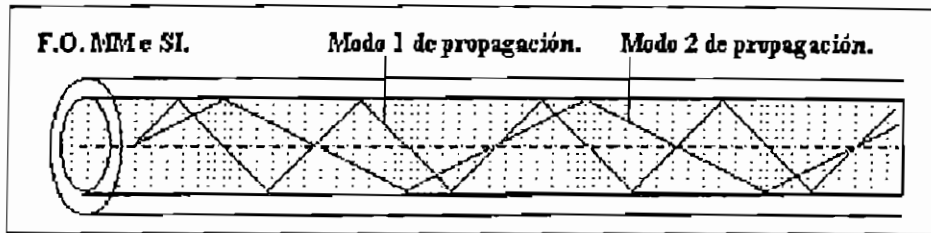


Figura 2. 79 Fibra óptica multimodo.

NOTA.- La fibra óptica del tipo SM también corresponde a la categoría de la F.O. del tipo SI.

## 2.5.5 Combinación de Tipos de Fibras Ópticas

### 2.5.5.1 Fibras Ópticas SI y SM

Ventajas:

- La dispersión de la señal es mínima.
- Es muy útil para líneas largas y anchos de banda de gran magnitud.

Desventajas:

- La apertura numérica es muy baja.
- El acoplamiento de la fuente de luz es difícil de lograr.
- El alineamiento en los empalmes es difícil de realizar.

### 2.5.5.2 Fibras Ópticas SI y MM

Ventajas:

- El acoplamiento a la fuente de luz es fácil de realizar.
- Su costo es bajo.
- La apertura numérica es alta.

Desventajas:

- La dispersión de la señal es alta.
- El ancho de banda es mínimo.
- Se puede usar solamente en líneas cortas que requieran anchos de banda mínimos.

### 2.5.5.3 Fibras Ópticas GI y MM

Ventajas:

- No presentan problemas de acoplamiento con los emisores o receptores de luz.
- Posee un BW (ancho de banda) superior y menos dispersión que las F.O. de SI y MM.

Desventajas:

- No se aplica para transmisiones en distancias largas.
- No se usa con transmisiones que necesitan anchos de banda demasiado altos.

## 2.5.6 Clasificación de las Fibras Ópticas según el Material del Dieléctrico

### 2.5.6.1 Fibra Óptica de Vidrio

La fibra óptica de vidrio está constituida por vidrio de cuarzo.

Esta fibra óptica contiene Flúor (F), Boro (B) y Germanio (Ge), etc., como diversas clases de aditivo para cambiar el índice de refracción, aparte del cuarzo que está constituido por  $\text{SiO}_2$  = Si: silicio; O: oxígeno, que es el componente principal.

Este tipo de fibra se usa en redes de telecomunicaciones debido a que es excelente su estabilidad de fase en un período largo y la característica de transmisión que se consigue tiene fácilmente bajas pérdidas.

### 2.5.6.2 Fibra Óptica de Múltiples Componentes

La fibra óptica de múltiples componentes está constituida por múltiples componentes.

Estos múltiples componentes pueden ser principalmente:

- Cal sodada
- El vidrio

Se usa como aditivo:

- El metal alcalino de calcio (Ca) y
- Sodio (Na); etc..

### 2.5.6.3 Fibra Óptica de Plástico

La fibra óptica de plástico puede tener un material como por ejemplo:

- Resina Silicona
- Resina Acrílica

**Nota.-** También existe la fibra óptica de núcleo de vidrio y revestimiento de plástico.

### 2.5.7 Características de la Fibra Óptica

En un sistema de transmisión vía cable de fibra óptica, la velocidad de transmisión y la distancia entre repetidores están determinadas según:

- la dispersión de la fibra óptica; y,
- la atenuación de la fibra óptica.

#### 2.5.7.1 Atenuación en la Fibra Óptica

La pérdida de potencia luminosa a lo largo de la fibra, fue uno de los principales obstáculos que presentaba la transmisión óptica. Gracias a una intensa investigación, en los últimos 15 años, la atenuación se ha reducido desde aproximadamente 1000 dB/Km a menos de 0.2 dB/Km.

La atenuación conduce a la disminución de la amplitud de la señal.

La potencia óptica acoplada a la fibra desde la fuente aparece a la salida del canal determinada por la ecuación :

$$P_{out} = P_{in} \cdot 10^{\left(\frac{L\alpha}{10}\right)} \quad \text{Ecuación 2.56}$$

donde:

$P_{in}$  = potencia óptica acoplada a la fibra con el emisor.

$P_{out}$  = potencia óptica acoplada a la fibra con el receptor.

$L$  = distancia entre los dos puntos de transmisión óptica.

Entonces el coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) por unidad de longitud, resulta de la expresión anterior como:



$$\alpha = \frac{-10}{L} \left[ \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} \right] \quad \text{Ecuación 2.57}$$

De lo anterior queda patente que la reducción de la atenuación  $\alpha$  es para un sistema de transmisión de mayor importancia, que la potencia acoplada a la fibra.

A continuación veremos algunas causas de la atenuación:

**Absorción del Material**

Este concepto abarca tanto las pérdidas ocasionadas por impurezas, como pérdidas intrínsecas.

**a) Impurezas de la Fibra.-**

Las impurezas en el núcleo de la fibra por presencia de iones  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , y  $\text{Cr}^3$  causan una pérdida de 1 dB/Km ya en concentraciones de una parte en  $10^9$  o, en el mejor de los casos, de 1.25 partes entre  $10^6$ . (ver figura 2.80)

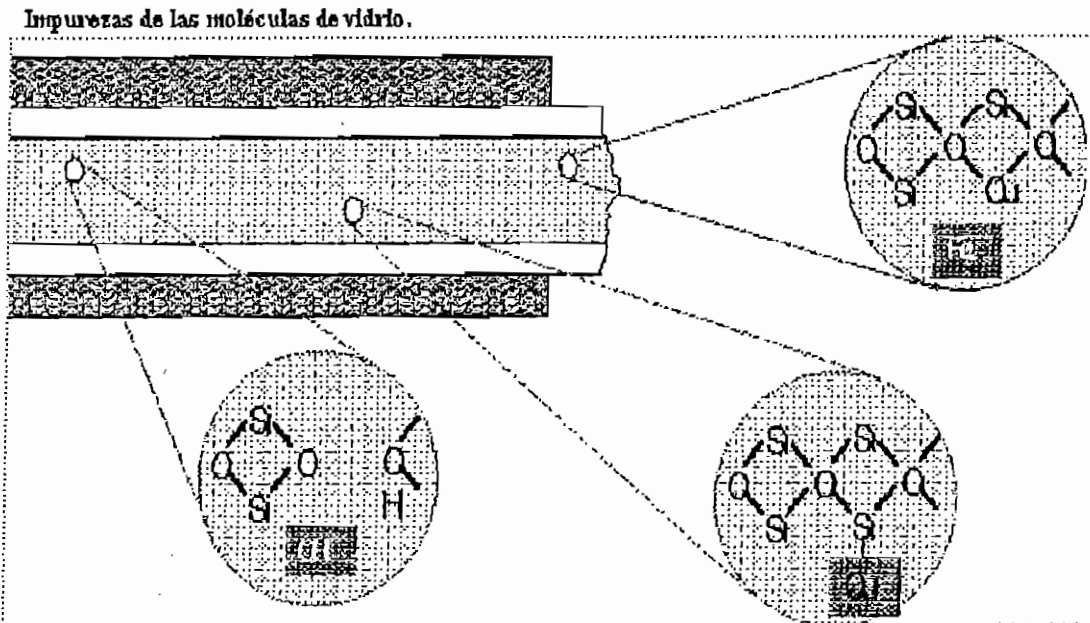


Figura 2. 80 Impurezas de la fibra óptica.

Como podemos ver en la figura 2.81 la energía óptica es absorbida por las impurezas. Estas pérdidas pueden ser reducidas mejorando los métodos de fabricación. Cada una de

estas impurezas atenúa sólo ciertas longitudes de onda sin afectar a las demás. El más notable es el caso de las impurezas residuales en pequeñísimas cantidades de los iones de hidróxido (OH) que causan máximos relativos de atenuación para longitudes de 0.95, 1.25 y 1.4  $\mu\text{m}$ . (ver figura 2.83)

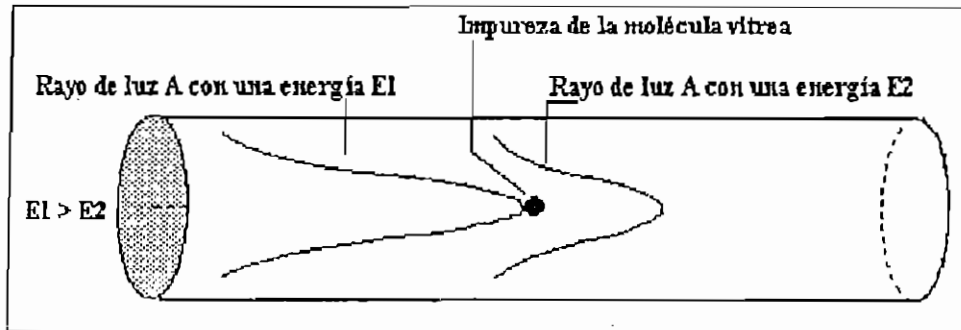


Figura 2. 81 Absorción de la energía óptica por impurezas.

#### b) Pérdidas Intrínsecas.-

En la región del infrarrojo a 1.55  $\mu\text{m}$  empieza un crecimiento rápido de la absorción, debido a la resonancia de los materiales que hace saltar los electrones desde niveles energéticos bajos a otros más altos, absorbiendo así la energía óptica. (ver figura 2.83)

#### Esparcimiento del Material

Se define como esparcimiento o difusión del material la absorción y reradiación de energía por las moléculas. La energía de la luz difundida es sustraída del haz inicial, que resulta así debilitado en el proceso. Se debe principalmente a la falta de homogeneidad de la estructura vítrea, causando así fluctuaciones del índice de refracción y por ende, una pérdida de la energía óptica útil, que además es desviada del núcleo por estas no homogeneidades.

Según el porte de los centros difusores y sus índices de refracción en relación al medio que los rodea, la difusión se presenta en las siguientes formas:

- la difusión Mie,
- la difusión de Raman ,
- la difusión de Brillouin, y

- la difusión de Rayleigh.

El esparcimiento del material, representado principalmente por la difusión Rayleigh define los límites teóricos para la atenuación más baja posible, que están dados por el coeficiente de atenuación de la difusión Rayleigh para el caso del cuarzo puro por la ecuación:

$$\alpha_{rayleigh} = (0.622) \left( \frac{N^2}{2.123 \lambda} \right)^4 \quad \text{Ecuación 2.58}$$

donde:

$\lambda$  = longitud de onda

N = índice de refracción. (ver figuras 2.82 y 2.83)

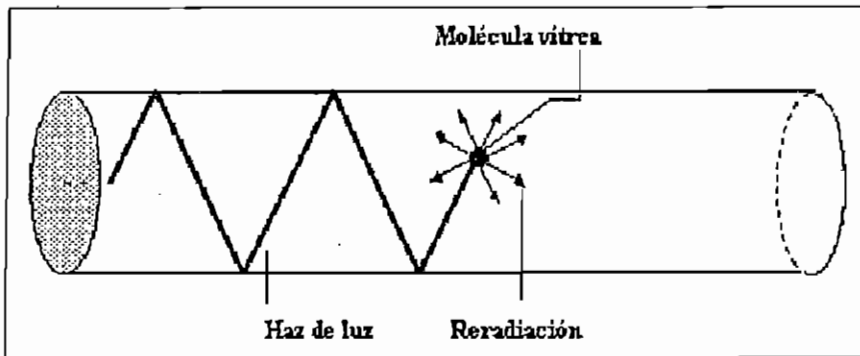


Figura 2. 82 Reradiación de la energía óptica.

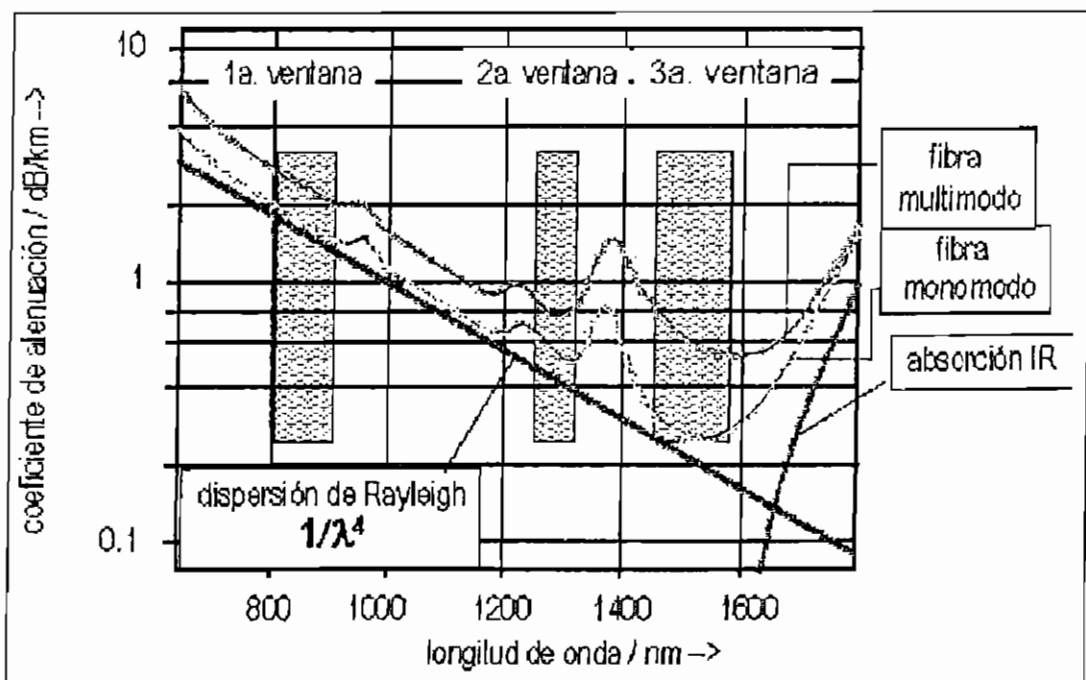


Figura 2. 83 Curvas de la atenuación de la fibra óptica.

## Distorsión de la Guía Óptica

Estas pérdidas se deben a las irregularidades geométricas del núcleo a lo largo del eje, que pueden ocasionar una desviación de la luz hacia el manto.

Estas imperfecciones estructurales se deben a que en la práctica el núcleo y el revestimiento de la fibra óptica no siempre se forma de una manera cilíndrica uniforme perfecta con la dirección de la longitud de onda.

En general, existen diversas concavidades y convexidades microscópicas entre las paredes del núcleo y del revestimiento, que causan dispersión de la luz.

Como podemos ver en la figura 2.84, alguna luz no puede propagarse dentro del núcleo y se irradia en el revestimiento.

A esta clase de pérdidas también se las conoce como pérdidas por microcurvatura.

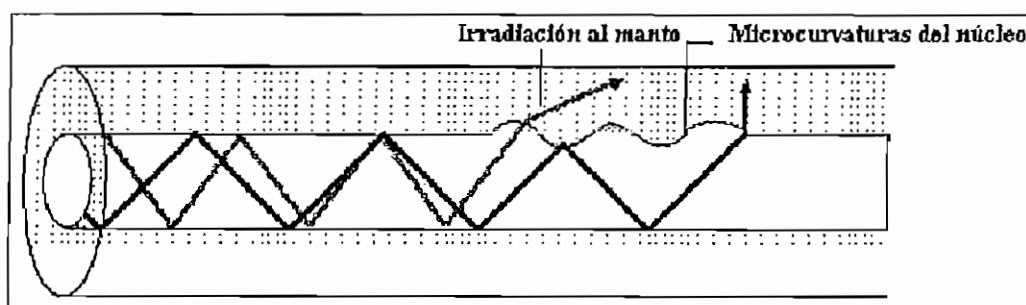


Figura 2. 84 Pérdida por distorsión de la guía óptica.

## Radiación por Curvatura

Cualquier curvatura de la fibra tiene como consecuencia una distribución asimétrica del campo electromagnético en el interior de la guía óptica, lo que desvía la energía desde el núcleo hacia el manto.

Como se observa en la figura 2.85 esta pérdida ocurre cuando doblamos la fibra; el rayo de luz que entra en una superficie límite entre el núcleo y el manto en un ángulo menor que el ángulo crítico, es radiado fuera del núcleo de la fibra óptica que ha sido doblada. Se le conoce también como pérdida por flexión.

A esta clase de pérdidas también pertenecen las que se originan por flexión del eje de la fibra óptica en el orden de algunos micromilímetros cuando presiones desiguales son aplicadas a la fibra; a estas pérdidas se les conoce con el nombre de pérdidas por microflexión.

En la figura 2.86 podemos ver algunos datos referentes a estas pérdidas por curvatura.

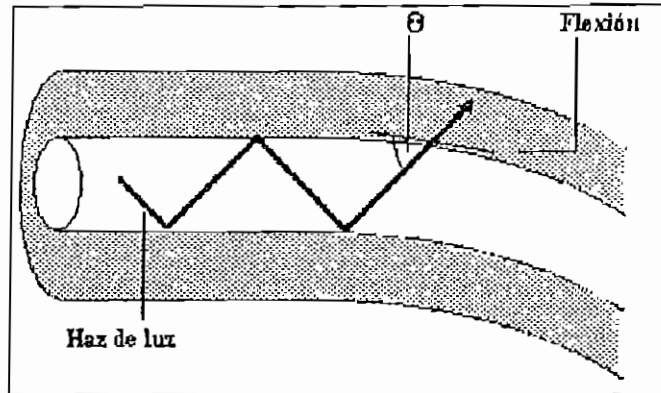


Figura 2. 85 Pérdida por curvatura de la fibra.

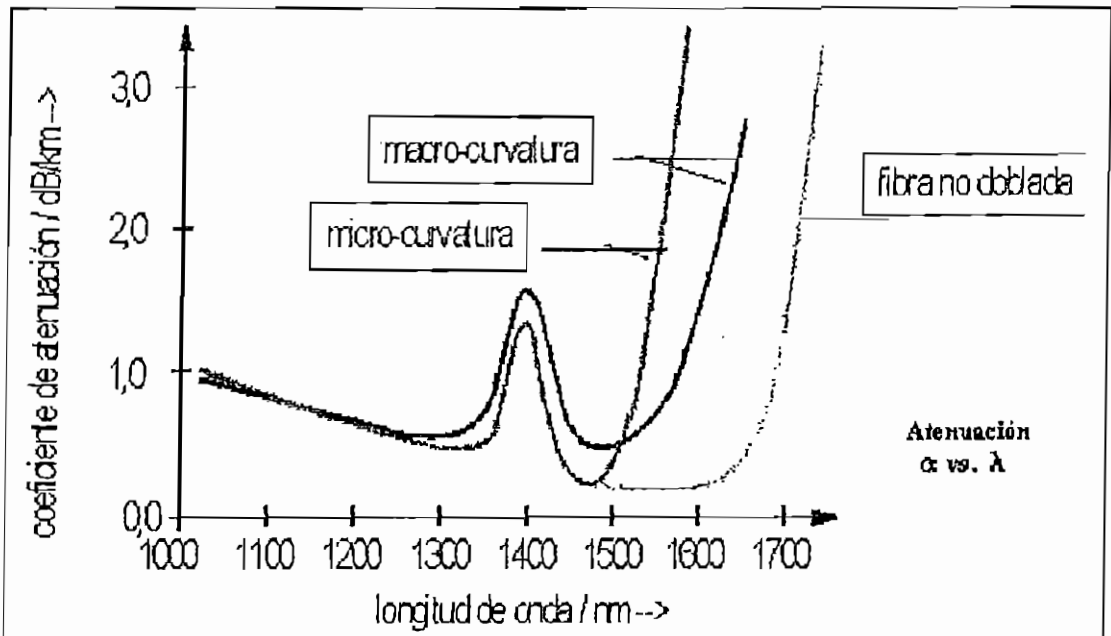


Figura 2. 86 Curvas de atenuación de la fibra.

### 2.5.7.2 Dispersión en la Fibra Óptica

Las portadoras electromagnéticas del espectro luminoso tienen una frecuencia de unos  $3 \cdot 10^{14}$  Hz. Este hecho sugiere a nuestra imaginación una fuente de ancho de banda casi inagotable. Aprovechando solamente 5 millonésimas de esa fuente, el ancho de banda alcanzaría 1.5 GHz; lo que coincide con el sentido actual de la tecnología de fibra óptica. Lamentablemente hay varios factores que limitan el ancho de banda utilizable en la práctica. Entre ellos se encuentra el fenómeno de dispersión.

## Dispersión en General

**Concepto.-** La dispersión es un concepto genérico para todos los efectos que ocasionan diferencias de tiempo de propagación y por lo tanto limitan el ancho de banda utilizable en la transmisión. En el caso de la luz, la causa de este fenómeno es el hecho, de que la velocidad de fase y por ende el tiempo de propagación de una onda depende de la longitud onda.

### Dispersión en Fibras Ópticas

- La energía óptica que se propaga en una guía óptica se compone generalmente de un número de modos y de un espectro de longitudes de onda o frecuencias.
- Como resultado, los componentes de la energía óptica experimentan diferentes retardos de propagación de los modos y de las longitudes de onda de propagación ocasionando un **ENSANCHAMIENTO TEMPORAL** de la señal transmitida. En consecuencia los pulsos transmitidos se ensanchan, lo que equivale a la limitación del ancho de banda y el medio se comporta como un filtro pasa bajo.
- Retardo dispersivo ( $\sigma$ ).- Como los componentes de un pulso (modos, frecuencias) se propagan a velocidades desiguales, llegan por lo tanto al receptor en tiempos diferentes dentro de un intervalo, llamado: "**RETARDO DISPERSIVO**" ( $\sigma$ ). Mientras que este retardo no sea mayor que la mitad del intervalo unidad o sea:

$$\sigma < 1/(2B)$$

la degradación causada por la dispersión no afecta la transmisión, dado que los pulsos no se trasladan uno con otro, pudiendo ser identificados entonces con precisión por el receptor. Este hecho define también el límite del ancho de banda utilizable. para la transmisión.

El retardo dispersivo total está dado por la raíz cuadrada de la suma cuadrática de la:

- dispersión modal; más
- la dispersión cromática.

La dispersión del material y de la guía de onda se refieren a cada modo, por lo que se suman de modo lineal. Esta suma es la llamada dispersión cromática.

Por lo tanto el valor cuadrático medio de la dispersión total será:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_c^2} = \sqrt{\sigma_m^2 + (\sigma_r + \sigma_g)^2} \quad \text{Ecuación 2.59}$$

donde:

$\sigma_c$  = dispersión espectral o del material

$\sigma_g$  = dispersión de la guía óptica

$\sigma_m$  = dispersión modal

$\sigma_r$  = dispersión cromática.

### 2.5.8 Limitación del Ancho de Banda

El ancho de banda de transmisión en fibras ópticas significa el espectro de frecuencias que pueden ser transmitidas a una distancia de 1km con una atenuación igual o menor que 3 dB o sea la potencia de salida de la frecuencia más alta es igual o mayor que la mitad de su potencia de entrada.

Se supone habitualmente que, siendo la excitación un impulso de Dirac, la respuesta en el tiempo y en frecuencia adoptan una distribución de Gauss cuya desviación típica es la dispersión total.

Las distribuciones del impulso recibido en función del tiempo y de la frecuencia son como se ve en la figura 2.87, 2.88, 2.89 y están definidas por las funciones:

$$\phi(t) = \left[ \frac{1}{(\sqrt{2\pi})\sigma} \right] \left[ e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \right] \quad \text{Ecuación 2.60}$$

$$\Omega(\omega) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right] \left[ e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}} \right] \quad \text{Ecuación 2.61}$$

donde:

$\sigma$  = dispersión total

t = tiempo

$f$  = frecuencia

$w$  = velocidad angular

Con estas hipótesis y planteando las ecuaciones para  $f = f_c$  y  $f = 0$ ; se puede deducir de la ecuación 2.61 que el ancho de banda  $B$  es:

$$B = f_c = \frac{w_c}{2\pi} = \frac{0.187}{\sigma} \quad \text{Ecuación 2.62}$$

donde:

$B$  = ancho de banda

$f_c$  = frecuencia de corte

$w_c$  = velocidad angular de corte

Apoyándonos en la ecuación 2.60 y planteando las ecuaciones para  $t=0$  y  $t = \phi_0/2$ , obtenemos la relación entre  $\Gamma$  y  $\sigma$ ; la misma que es:

$$\sigma = \frac{\Gamma}{2.35} \quad \text{Ecuación 2.63}$$

donde:

$\Gamma$  = ancho del impulso al 50%

De las ecuaciones 2.62 y 2.63 se deduce que:

$$B = \frac{0.44}{\Gamma} \quad \text{Ecuación 2.64}$$

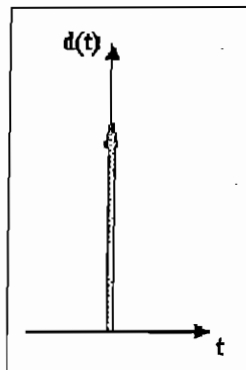


Figura 2.87 Función impulso.



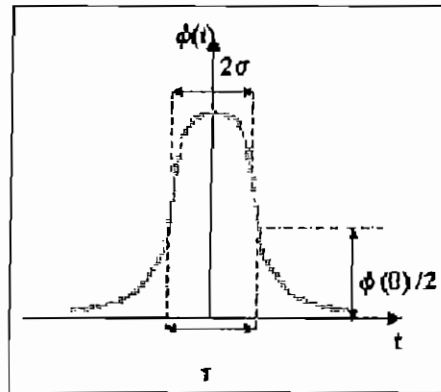


Figura 2. 88 Distribución del impulso en función del tiempo.

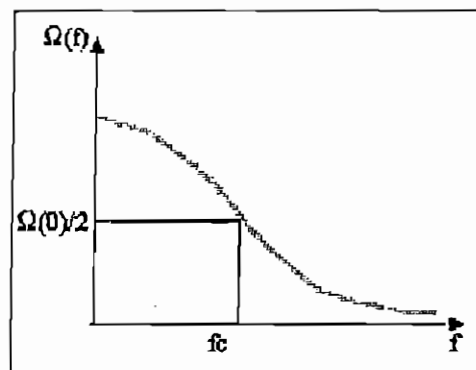


Figura 2. 89 Distribución del impulso en función de la frecuencia.

### 2.5.9 Dispersión del Material

Se manifiesta como variación del índice de refracción con la longitud de onda.

Mientras que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, la velocidad en una sustancia material es distinta para las diferentes longitudes. En consecuencia, estando ligadas estas magnitudes con el índice de refracción por medio de las leyes de Snell y Michelson, el índice de refracción de una sustancia es otro para cada longitud de onda, o mejor dicho es más bajo para ondas más largas y aumenta para las cortas.

En otras palabras: El índice de refracción como así mismo la velocidad de la luz en fibras es función de la longitud de onda, de esta manera, la luz de una longitud de onda experimenta un retardo de propagación diferente a la onda de otras longitudes. Por lo tanto, la energía óptica de diferentes longitudes de onda, lanzada simultáneamente a la fibra, aparece a la salida temporalmente dispersa. (ver figura 2.90)

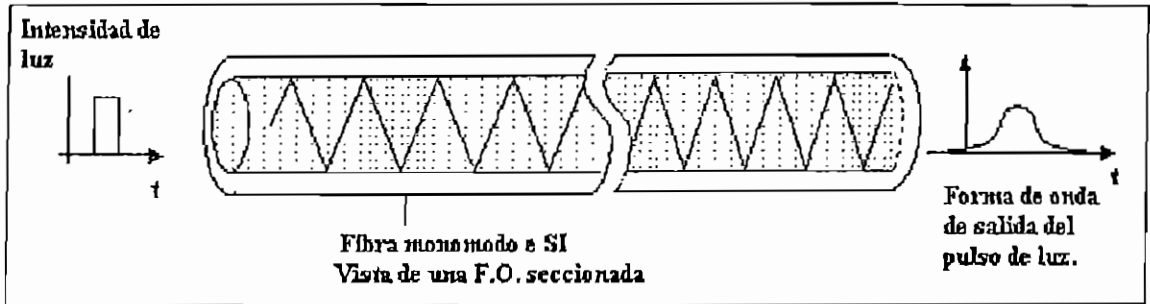


Figura 2.90 Dispersión material de la fibra óptica.

Para el cálculo de la dispersión material se usa la ecuación:

$$\Delta t_{\text{espectral}} = \Gamma = k_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad \text{Ecuación 2.65}$$

donde:

$K(\lambda)$ = coeficiente de dispersión del material.

$\Delta\lambda$ = ancho espectral.

$L$ = longitud del enlace.

**Nota.-** Esta ecuación es fácilmente deducible.

### 2.5.10 Dispersión Modal

El problema es propio de las fibras multimodo, donde la energía óptica se propaga en un número elevado de modos, ocupando un espectro de longitudes de onda considerable.

#### Concepto.-

Como vemos en la figura 2.91 cada modo tiene su exclusiva y propia velocidad de propagación y retardo de grupo. Usando el modelo de la óptica geométrica, cada modo puede ser representado por un rayo con una trayectoria determinada.

De esta manera, la energía óptica lanzada simultáneamente a la entrada de la fibra a través de varios modos, aparece a la salida de la fibra temporalmente dispersa.

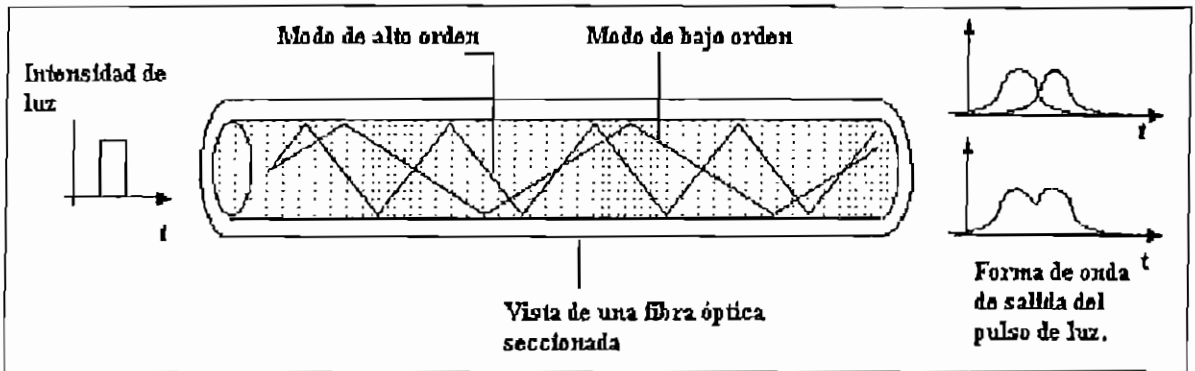


Figura 2. 91 Dispersión modal de la fibra óptica.

### 2.5.10.1 Dispersión Modal de la Fibra Óptica de Índice Escalonado

En estas fibras el retardo máximo se produce entre el rayo que accede en la dirección del eje de la fibra y el que entra con un ángulo igual al límite. La diferencia de tiempos invertidos en recorrer la unidad de longitud por ambos rayos se deduce de la figura 2.11 y de la ecuación 2.29; obteniendo:

$$t_m - t = \frac{1}{v_1}(\ell_m - \ell) = \frac{n_1}{C} \left( \frac{\ell}{\text{sen } \alpha_{li}} - \ell \right) = \frac{n_1}{C} \ell \left[ \frac{1}{\text{sen } \alpha_{li}} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 2.66}$$

donde:

$v_1$  = velocidad de propagación de la luz en el núcleo

$\ell$  = longitud recorrida por un rayo axial

$\ell_m$  = longitud correspondiente a la del modo m

$n_1$  = índice de refracción  $n_1$  (del núcleo)

$C$  = velocidad de la luz

Ahora despejando y con la ayuda de la ecuación 2.23 obtenemos la dispersión modal por unidad de longitud como:

$$\Delta t = t_m - t = \sigma_{msl} = \frac{n_1}{C} \left[ \frac{n_1}{n_2} - 1 \right] = \frac{n_1}{C} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \quad \text{Ecuación 2.67}$$

donde:

$n_1$  = índice de refracción  $n_1$  (del núcleo)

$n_2$  = índice de refracción  $n_2$  (del revestimiento)

$C$  = velocidad de la luz

Sabiendo que la apertura numérica en función de  $n_1$  y  $n_2$  está dada por la ecuación 2.23 y reemplazando en la anterior ecuación obtenemos la expresión por medio de la cual podemos calcular la diferencia de retardos de los diferentes modos:

$$\sigma_{m\delta} = \frac{n_1}{C} \left[ \frac{AN^2}{n_2(n_1 + n_2)} \right] \approx \frac{AN^2}{2n_1 C} \quad \text{Ecuación 2.68}$$

donde:

$AN$  = es la apertura numérica

### 2.5.10.2 Dispersión Modal de Fibras Ópticas de Índice Gradual

Para deducir el retardo relativo de los modos en estas fibras hay que acudir a las ecuaciones de Maxwell. Aquí es donde adquiere todo su significado la elección del perfil de índice a partir del parámetro  $g$ , para hacer mínima la diferencia de tiempos invertidos en su recorrido por los diferentes modos.

El valor de la dispersión para  $g_{\delta\text{óptimo}}$  es:

$$\sigma_{m\delta} = \frac{AN_{(0)}^4}{8n_{1(0)}^3 C} (140) \left[ \frac{n_{1(0)} - n_2}{n_{1(0)}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.69}$$

En resumen la fibras de índice gradual presentan una dispersión modal mucho menor que las de salto de índice.

$$\sigma_{m\delta} = \sigma_{m\delta} \frac{AN_{(0)}^2}{4n_{1(0)}^2} \approx \sigma_{m\delta} \frac{\delta}{2} \quad \text{Ecuación 2.70}$$

### 2.5.10.3 Dispersión de la Guía de Onda

La dispersión debida a los parámetros ópticos y geométricos de la fibra sólo tiene relevancia en las fibras monomodo, ya que en las multimodo la dispersión es pequeña para los modos alejados de la frecuencia de corte, porque en aquellos el radio es mucho mayor que  $\lambda$ , y los modos próximos al corte transportan una fracción pequeña de la energía total. Por tanto, en éstas se puede despreciar la dispersión de la guía de onda.

Al referirla a fibras monomodo tendrá carácter intramodal, pero lo mismo que la dispersión espectral era provocada por las diferentes velocidades de las componentes de cada modo, ahora la dispersión nace del hecho de que correspondiendo a cada longitud de onda un índice de refracción diferente, el ángulo que forma la trayectoria asociada a ellas será distinto, y también los caminos recorridos por esas componentes espectrales; como vemos en la figura 2.92.

La dispersión correspondiente a este efecto vendrá dada por una expresión similar a la ecuación 2.63 y dada por:

$$\sigma_g' = \frac{\Gamma}{2.35} = \frac{-G_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \cdot L}{2.35} \quad \text{Ecuación 2.71}$$

El valor de G se puede aproximar mediante:

$$G_{(\lambda)} = \frac{\lambda}{4\pi^2 a^2 n_1 C} \quad \text{Ecuación 2.72}$$

El signo menos pretende indicar que esta dispersión actúa en sentido contrario a la espectral; es decir, que la dispersión temporal total, y única en fibras monomodo, asociada a cada modo será algebricamente  $\sigma_e + \sigma_g$ .

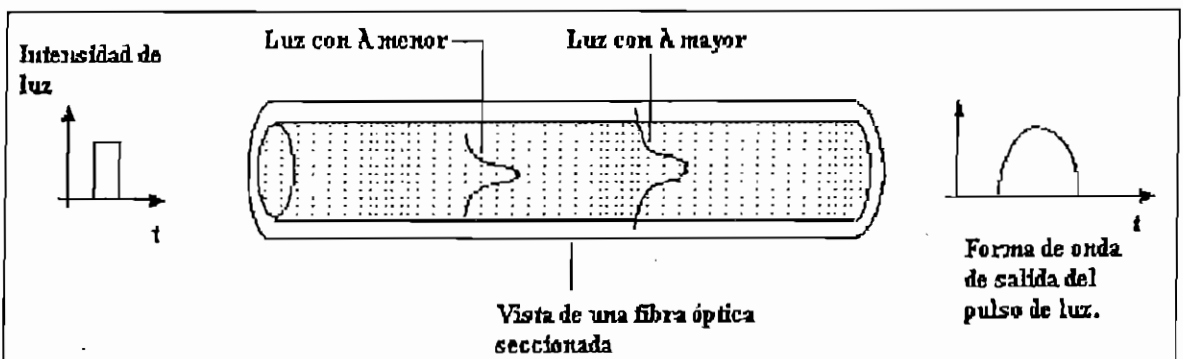


Figura 2. 92 Dispersión de la guía de onda.

En la siguiente figura observaremos la variación que tiene la dispersión con el perfil.

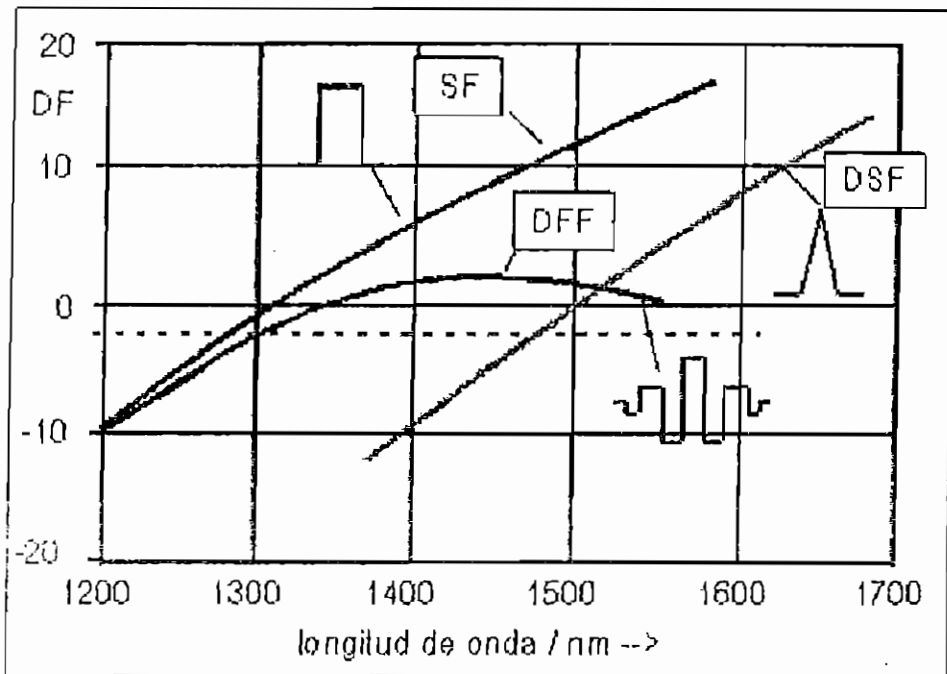


Figura 2.93 Variación de la dispersión con el perfil.

donde:

SF = fibra estándar.

DFF = fibra con técnica de dispersión aplanada.

DSF = fibra con técnica de dispersión desplazada.

### 2.5.11 Ancho de Banda Total

En las fibras multimodo es:

$$B = \frac{0.187}{\sqrt{\sigma_m^2 + (\sigma_e + \sigma_g)^2}} \quad \text{Ecuación 2.73}$$

donde:

$\sigma_e$  = dispersión espectral o del material

$\sigma_g$  = dispersión de la guía óptica

$\sigma_m$  = dispersión modal

Para las fibras monomodo se puede aplicar la ecuación:

$$B = \frac{0.187}{\sigma_e + \sigma_g} = \frac{0.44}{|M(\lambda) - G(\lambda)| \cdot \Delta\lambda} \quad \text{Ecuación 2.74}$$

donde:

$\Delta\lambda$  = ancho de banda espectral

$M(\lambda) = K(\lambda)$  = coeficiente de dispersión del material

$G(\lambda)$  = coeficiente de dispersión de la guía de onda

### 2.5.12 Tecnologías de Fabricación de las Fibras Ópticas

Las características técnicas que determinan la calidad de los cables de fibras dependen en gran parte del proceso de fabricación de la fibra y de los materiales usados en ella. Hasta el momento se han propuesto muchos procesos para la fabricación, y la rápida evolución de las mejoras permite lograr atenuaciones reales prácticamente coincidentes con las teóricas, centrándose los esfuerzos actualmente en mantener los valores logrados para la atenuación y mejorar los anchos de banda. El índice de refracción de la fibra de sílice se modifica, tanto en el núcleo como en el revestimiento, mediante la adición de pequeñas cantidades, fuertemente controladas, de óxidos de germanio, boro y fósforo, partiendo para ello de tetracloruros y pentacloruros, todos ellos líquidos a la temperatura ambiente.

En esencia, los procesos de fabricación de fibras son dos en la actualidad: el de crisol y el de proforma. El primero se utiliza para fibras de prestaciones limitadas en atenuación y ancho de banda (aplicaciones de circuito cerrado, medicina, industria del automóvil, etc.), siendo de baja calidad. Las derivadas del segundo proceso son las de más interés en el campo de las comunicaciones (enlaces urbanos e interurbanos de voz, vídeo y datos, y redes de área local en aplicaciones de banda ancha).

#### 2.5.12.1 Técnica del Doble Crisol

La técnica del doble crisol parte de dos crisoles concéntricos que contienen en fase líquida los vidrios que, al discurrir por su parte inferior y solidificarse, originan el núcleo y el revestimiento.

Los vidrios que alimentan a cada crisol son de composiciones diferentes y funden en su interior al estar inmersos en hornos de inducción. Por la parte inferior de los crisoles emergen de forma concéntrica y en fase líquida los vidrios que formarán núcleo y manto. La falta relativa de definición de los diámetros obtenidos implica que sólo se fabriquen mediante este procedimiento fibras de índice escalonado, y preferentemente multimodo. Además, la presencia de sustancias contaminantes procedentes de los crisoles hace difícil obtener fibras de baja atenuación.

### **2.5.12.2 Técnicas para la obtención de la Preforma**

La técnica de fabricación a base de preformas parte de una barra sólida que se obtiene a través de diversos procesos, y cuyas características macroscópicas son equivalentes a las de la fibra definitiva. Esta técnica permite lograr fibras multimodo y monomodo en cualquier modalidad de perfil del índice de refracción.

La preforma es un cilindro macizo de vidrio de 2 metros de longitud y 2 cm de diámetro de la que, por un estiramiento tras un tratamiento previo, se obtienen unos 25 km de fibra. Sus características macroscópicas son similares a las de la fibra que se obtendrá de ella. La realización de fibras por la técnica de la preforma se efectúa en dos etapas, a saber:

- La primera es la realización de la propia preforma.
- La segunda fase de los sistemas de preforma consiste en el estirado de la misma para obtener la fibra definitiva.

#### **a) Deposición de Vapores Químicos (CVD. Chemical Vapor Deposition).-**

Este proceso en sus diversas variantes, cubre más del 90% de las fibras comercializadas.

##### **a.1) Procesos IPVD (Inside Vapor Deposition. Oxidación Interior en Fase de Vapor) y OPVD (Outside Vapor Deposition. Oxidación Exterior en Fase de Vapor).-**

Los sistemas IPVD y OPVD son tecnológicamente equivalentes y comercializados por Corning Glass. El primero de ellos fue utilizado para obtener las primeras fibras con menos de 20 dB/Km de atenuación.



En la figura 2.94 se muestra un esquema del proceso OPVD. En él la preforma se obtiene en dos etapas:

- Deposición de los vapores sobre la preforma.
- Sinterización o colapsado de la preforma.

La primera se realiza utilizando como soporte de la futura preforma un mandril cerámico o de grafito de unos 5 mm de diámetro que gira a velocidad constante y en el que, en forma sucesiva y mediante una llama adecuada, se depositan las capas de vidrio que darán lugar al perfil de índice de refracción deseado.

Acabado este proceso se retira el mandril aprovechando la diferencia de coeficientes de dilatación entre la cerámica y el depósito vítreo realizado (preforma porosa u hollín), y a continuación se le somete a un proceso de sinterización a 1500 °C en atmósfera de helio para evitar la contaminación por iones OH<sup>-</sup>, produciéndose el estiramiento de la preforma original, que adopta la forma definitiva con la que trabajará.

Longitudes típicas de fibra obtenidas por este procedimiento son de unos 10 a 15 Km, con velocidades medias de crecimiento de la preforma porosa de 0.7 a 1.5 gr/minuto. Los valores de atenuación obtenidos por este procedimiento son realmente bajos.

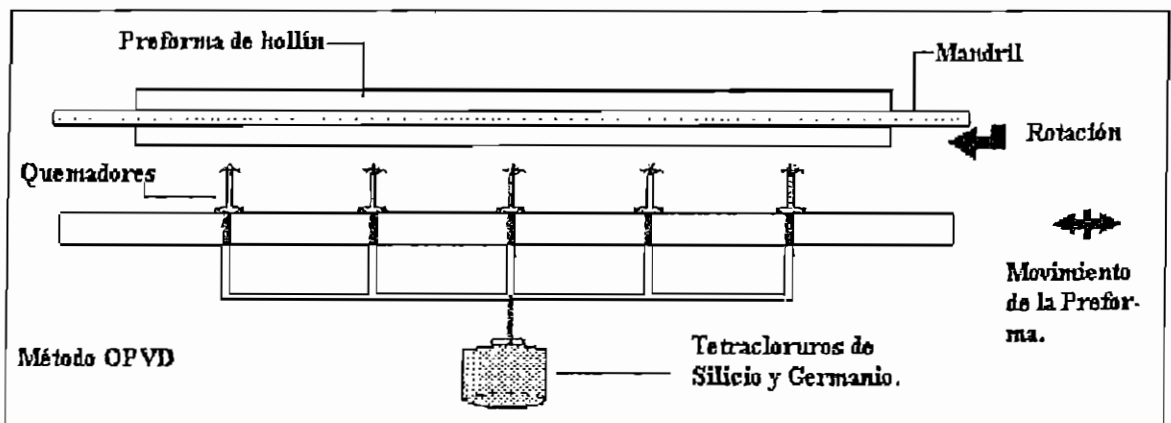


Figura 2.94 Método OVD.

### a.2) Método MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition. Deposición de Vapor Químico Modificado).-

Desarrollado por los Laboratorios Bell, es, dentro de los métodos de deposición, el más conocido y se utiliza habitualmente en la fabricación de fibras monomodo.

En el proceso se parte de una barra hueca de  $\text{SiO}_2$  puro de unos 2 metros de longitud y 4 cm de diámetro, a la que se hace girar dentro de dos puntos bajo la acción de un quemador de atmósfera reductora.

La temperatura del proceso es próxima a los 1900 °C, y por un extremo del cilindro hueco se introducen tetracloruros de silicio y germanio, que están contenidos en recipientes en fase líquida, tras haber pasado por un circuito mezclador en el que se dosifican sus proporciones exactamente con tricloruros de fósforo y boro, oxígeno y helio. Los óxidos formados se depositan en la cara interna del cilindro y desde aquí se difunden hacia el exterior.

La variación de la velocidad de crecimiento (obtenida variando la superficie calentada por los mecheros) permite controlar la diferencia de los índices de refracción del núcleo y del manto (o revestimiento). En cualquier caso, no conviene exceder la velocidad de 1 gr/min. Además, una excesiva deposición de capas hace menos preciso el perfil del índice de refracción, lo que impide obtener fibras multimodo de gran anchura de banda.

Con un control adecuado de los dopantes es posible conseguir una disminución paulatina del índice de refracción desde el eje de la fibra hasta el revestimiento. Así, el germanio aumenta el índice de refracción, mientras que el boro lo disminuye.

Una vez terminado el proceso de deposición se colapsa el tubo a temperatura más elevada, formando una varilla maciza o preforma, en cuyo centro la capa de sílice depositada constituye el núcleo de la futura fibra, y cuya parte externa, formada por la primitiva varilla con los dopantes adecuados, va a constituir el revestimiento de aquella. (ver figura 2.95)

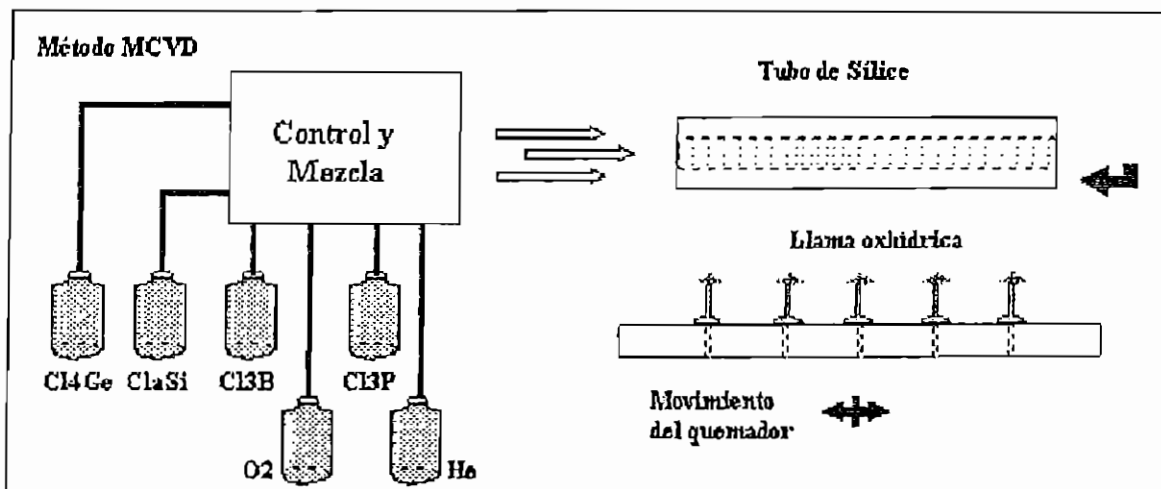


Figura 2. 95 Método MCVD

### a.3) Método PCVD (Plasma activated Chemical Vapor Deposition. Deposición de Vapor Químico Activado por Plasma).-

Es básicamente similar al anterior, con la diferencia de que se utiliza como fuente térmica un plasma radioeléctrico, en lugar de quemadores en atmósfera de hidrógeno. Parece ser que las temperaturas obtenidas así son más uniformes. Sin embargo, los resultados no son mejores.

### b) Deposición Axial de Vapores (VAD. Vapor Axial Deposition).-

En este método, desarrollado en Japón por la NTT, el crecimiento de la preforma no se realiza lateralmente, sino en la dirección del eje de la fibra mediante dos sopletes de oxihidrógeno que inyectan los dopantes en una varilla inicial (preforma porosa) a una temperatura de 1500°C. La posición relativa de los sopletes determinará el perfil del índice de refracción. Habitualmente se sitúan desplazados 45°.

Esta varilla se desplaza continuamente a lo largo de su eje, girando al mismo tiempo. La velocidad de desplazamiento debe ser tal que entre en un calentador de anillo a 2000°C cuando se considera que ha alcanzado la proporción adecuada de materias primas, en este anillo se produce el colapsado de la preforma porosa, obteniéndose la preforma transparente.

Este procedimiento presenta la ventaja de poder obtener preformas más largas y de menor atenuación; sin embargo, es más difícil el control de la uniformidad del índice de refracción a lo largo de la fibra.

### 2.5.12.3 Fabricación de la Fibra Optica a partir de la Preforma obtenida con Los procesos anteriores

La preforma obtenida por cualquiera de los procedimientos anteriores se monta después en una torre de estirado y se introduce en horno tubular, deslizándose en él a velocidad controlada. La temperatura en el interior del horno es de 2100°C, y la fibra se estira a partir del extremo fundido de la preforma.

El diámetro de la fibra se controla normalmente en valores de 125µm ±0.2 mediante un bucle de control que altera la velocidad de estirado al detectar variaciones del diámetro exterior medido.

A continuación se aplica a la fibra un revestimiento de acetatos, siliconas o nylon que protegerá la superficie de vidrio y absorberá esfuerzos localizados en la fase de cableado: es el llamado recubrimiento primario. Los procesos de fabricación incluyen sistemas de control del espesor y concentricidad de este recubrimiento, cuyos diámetros pueden oscilar entre 250µm y 1mm, con desviaciones admisibles comprendidas entre ± 15 y ± 25µm, dependiendo de la estructura que se deba dar al cable futuro.

La fibra completa queda constituida al aplicar a la estructura obtenida hasta ahora un segundo recubrimiento, recubrimiento secundario, que se puede realizar por extrusión directa sobre el recubrimiento primario con nylon o poliamidas (fibra de estructura densa o ajustada) o bien por extrusión de un tubo de mayor diámetro y materiales similares alrededor de la fibra (estructura holgada). En el primer caso, el diámetro exterior resulta ser del orden de 1mm y en el segundo, de 1.5 a 2.5 mm. La ventaja de este segundo procedimiento radica en la posibilidad de introducir petrolato o cualquier otra sustancia viscosa en el espacio entre recubrimientos, lo que protegerá a la fibra de la entrada de humedad, aislándola al mismo tiempo de las tensiones externas.

Para el cálculo del diámetro de la fibra se usa la expresión:

$$\phi_{.10} = d = D_o \left( \frac{v_o}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.75}$$

donde:

$D_o$  = diámetro de la preforma

$v_0$  = velocidad de ingreso de la preforma

$v$  = velocidad de salida de la f.o. o de estiramiento.

(ver figura 2.96)

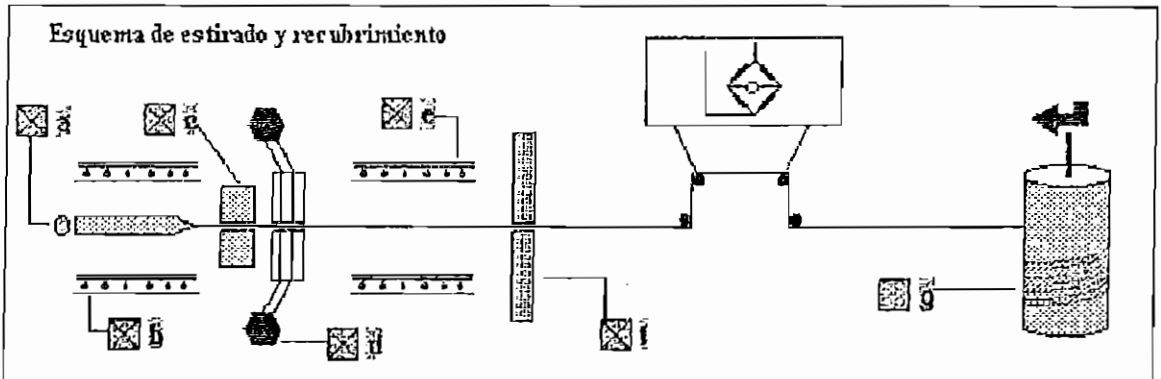


Figura 2.96 Esquema del proceso de estirado y recubrimiento de la fibra.

a = Preforma

b = Horno a 2100 °C

c = Controlador de diámetro de la fibra

d = Inyectores de polímeros

e = Horno para uniformizar el recubrimiento primario mediante rayos ultravioleta

f = Control de diámetro del recubrimiento

g = Tren de bobinado

## **CAPITULO III**

### **MODULO DE DISEÑO Y SIMULACION. METODOLOGIA APLICADA EN EL DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE ESTE MODULO.**

#### **3.1 CIRCUITO BASICO CON DIODOS LED'S**

Ya que una de las principales aplicaciones del LED es como indicador luminoso, es necesario conocer como diseñar un circuito en el cual se encuentren varios LED's y cuya disposición, en el circuito, sea en serie y en paralelo.

El circuito a implementar tiene la característica de que se hace el diseño para una serie de 3 diodos LED's en paralelo con otros tres, teniendo la posibilidad de que estos diodos LED's sean de cualquier color.

Se diseña los valores de resistencia adecuados para el circuito.

Aquí se trata de que LED's de cualquier color funcionen adecuadamente, sin riesgos de que no se encienda o se queme alguno de éstos.

En general, lo más conveniente es usar LED's que tengan las mismas características (LED's del mismo color).

En la figura 3.1 podemos observar el circuito a diseñar.

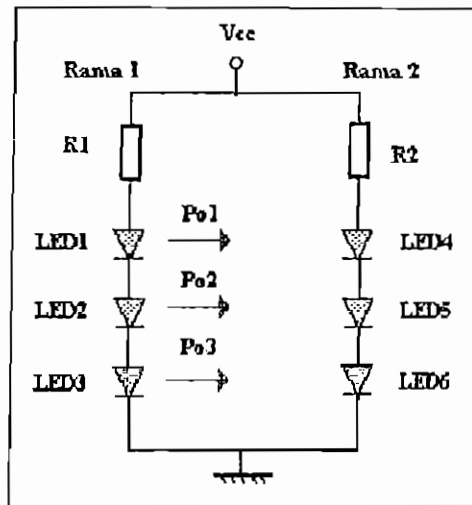


Figura 3. 1 Circuito con LED's en serie y paralelo .

En el diseño de este circuito necesitamos ingresar los siguientes datos :  
 (Los datos \* serán ingresados para cada uno de los LED's)

- $V_F$       Voltaje de caída del LED                      [Voltios]
- $I_{typ}$       Corriente típica de trabajo del LED              [mA]

Queriendo obtener los siguientes resultados :

- $R_1$       Resistencia en la rama 1                      [K $\Omega$ ]
- $R_2$       Resistencia en la rama 2                      [K $\Omega$ ]

**Diseño:**

Generalmente, los diodos LED's se alimentan con un voltaje superior a su voltaje de operación, siendo necesaria una resistencia limitadora de corriente que produzca una caída de voltaje. Con los datos que disponemos calculamos el valor de la resistencia en la rama 1:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{FT1}}{I_{trab1}}$$

donde:

\* En el anexo 2 tenemos los datos reales de algunos de los elementos ópticos usados en el diseño.

$$V_{FT1} = V_{F1} + V_{F2} + V_{F3}$$

$V_{FT1}$  = suma de los voltajes de operación de cada uno de los LED's de la rama 1.

$I_{trab1}$  = corriente de trabajo en la rama 1 (ver Nota)

Para el cálculo de la resistencia  $R_2$  lo hacemos de una manera análoga a la realizada para la resistencia  $R_1$ .

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{FT2}}{I_{trab2}}$$

donde:

$$V_{FT2} = V_{F4} + V_{F5} + V_{F6}$$

$V_{FT2}$  = suma de los voltajes de operación de cada uno de los LED's de la rama 1.

$I_{trab1}$  = corriente de trabajo en la rama 1 (ver Nota)

#### Nota:

Para escoger el LED a usar, debemos tomar en cuenta también ciertos criterios, como son:

Comparamos los voltajes en cada rama, para escoger el mayor de ellos y así tener un criterio para elegir el voltaje de polarización del circuito.

Si  $V_{FT1} > V_{FT2}$  entonces

$$V_{CC} > V_{FT1}$$

caso contrario

$$V_{CC} > V_{FT2}$$

Para elegir la corriente de trabajo en cada rama comparamos las corriente típicas de trabajo de cada LED y escogemos la máxima corriente típica de trabajo (de entre los LED's de cada rama) que sea menor a la mínima corriente de entre las corrientes máximas que soportan cada LED.

$$\max(I_{typ1}, I_{typ2}, I_{typ3}) < \min(I_{máx_{DC1}}, I_{máx_{DC2}}, I_{máx_{DC3}})$$

donde:

$$I_{máx_{DC}} = \text{Corriente máxima que soporta el LED} \quad [\text{mA}]$$

### 3.2 CIRCUITO BASICO CON UN FOTODETECTOR

Este realmente es el circuito más básico que tenemos, pero nos ayuda a comprender el funcionamiento de los fotodiodos en general.



Es decir, veremos que el fotodiodo se comporta como una fuente de corriente, cuyo valor dependerá de la irradiancia incidente en el fotodetector.

La figura 3.2 nos muestra el circuito a diseñar.

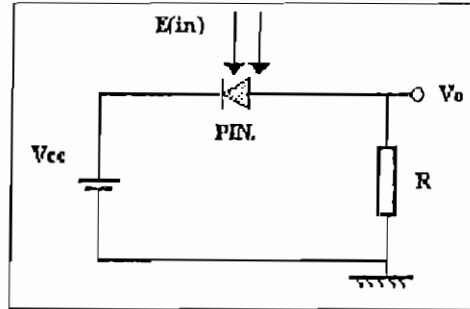


Figura 3.2 Circuito básico con fotodetector.

Vamos a ingresar los siguientes **datos** para el diseño de este circuito:

$V_{cc}$  Voltaje de polarización [Voltios]

$V_o$  Voltaje de salida [Voltios]

Sea:

$R$  Resistencia para el circuito [K $\Omega$ ]

Esperando obtener los siguientes **resultados**.

$E_{in}$  Irradiancia incidente en el fotodiodo [mW/cm<sup>2</sup>]

$I_{DC}$  Corriente que circula en el circuito [ $\mu$ A]

**Diseño:**

Con los datos que tenemos calculamos la corriente de trabajo que circula en el circuito con la siguiente ecuación:

$$I_{DC} = \frac{V_o}{R}$$

Ahora para el cálculo de la irradiancia de entrada necesaria para generar el voltaje de salida que deseamos, deberíamos ver las especificaciones del elemento (ver anexo 2) y aplicar la relación:

$$E_{in} = \frac{I_{DC} - i_{obs}}{m}$$

con:

$$m = \frac{I_{max} - i_{obs}}{E_{max}}$$

donde:

$E_{m\acute{a}x}$  = Irradiancia máxima [mW/cm<sup>2</sup>]

$I_{m\acute{a}x}$  = Máxima fotocorriente que genera el fotodiodo [A]

$i_{obs}$  = Corriente de oscuridad del fotodiodo [A]

**Nota:**

Para la elección del voltaje de polarización del circuito debemos tomar en cuenta que este no debe ser mayor al voltaje de ruptura inverso del fotodiodo, ya que en ese caso el fotodiodo se quemaría.

$$V_{cc} < V_R$$

donde:

$V_R$  = Voltaje de ruptura inverso del fotodiodo [Voltios]

El valor de la resistencia R puede ser cualquiera ya que el fotodetector se comporta como una fuente de corriente.

**Tomar en cuenta que cuando tratemos con voltajes negativos (por ejemplo el voltaje de polarización negativo, el voltaje de ruptura inverso, etc.) para el diseño siempre trabajaremos con sus valores absolutos.**

### 3.3 CIRCUITO CON FOTOTRANSISTORES EQUIVALENTE A COMPUERTAS LOGICAS (AND, NAND, OR, NOR)

Este circuito se refiere al trabajo de los fototransistores como compuertas lógicas. Es así que aquí tenemos otras cuatro subopciones para la elección del trabajo de dos fototransistores como compuerta: AND, OR, NAND y NOR; pero todas éstas trabajan bajo un mismo esquema que será descrito a continuación.

Básicamente se trata de que según incida o no luz a los dos fototransistores, en forma independiente, el resultado será un uno lógico o cero lógico, representado por la existencia o no de voltaje en el punto tomado como salida, respectivamente.

### 3.3.1 Fototransistores trabajando como compuerta AND

Este circuito trata de que dos fototransistores trabajen como una compuerta AND.

Es decir, el voltaje de salida será un  $1_L$  cuando los dos fototransistores estén saturados a la vez y estará en  $0_L$  cuando uno de los fototransistores se corte; esto sucederá cuando llegue la irradiancia adecuada a los fototransistores y deje de llegarla, respectivamente.

En la figura 3.3 podemos observar el circuito a implementar.

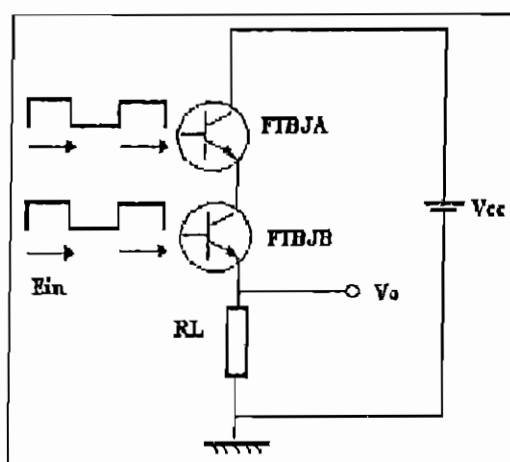


Figura 3.3 Compuerta AND con dos fototransistores.

Para el diseño de este circuito necesitamos los siguientes datos :

$V_{cc}$  Voltaje de polarización [Voltios]

$V_{CESat}$  Voltaje colector-emisor de saturación de trabajo [Voltios]

Sea:

$I_c$  Corriente de colector de trabajo [mA]

Esperando obtener los siguientes resultados:

$R_L$  Resistencia de carga [K $\Omega$ ]

$V_o$  Voltaje de salida [Voltios]

**Diseño:**

Con los datos que disponemos calculamos la resistencia de carga, siendo ésta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat\ A} - V_{CEsat\ B}}{I_C}$$

El máximo (con 1 lógico a la salida) voltaje de salida en la resistencia de carga estará dado por:

$$V_o = (R_L \cdot I_c)$$

**Nota:**

Debemos tener presente de no rebasar ninguna de las especificaciones para los fototransistores, es decir:

Para la determinación del voltaje de polarización del circuito debemos tomar en cuenta que cuando se corta uno de los fototransistores, éste soporta entre el colector y emisor el voltaje de polarización del circuito.

$$V_{CEmáxA} \text{ y } V_{CEmáxB} > V_{CC}$$

donde:

$$V_{CEmáx} = \text{Voltaje colector-emisor máximo del fototransistor} \quad [\text{Voltios}]$$

Como vamos a suponer una corriente de colector de trabajo debemos tomar en cuenta que no supere los límites de la corriente máxima permitida para cada fototransistor.

$$I_c < I_{cmáxA} \text{ y } I_{cmáxB}$$

donde:

$$I_{cmáx} = \text{Corriente de colector máxima del fototransistor} \quad [\text{mA}]$$

Hay que aclarar que lo ideal sería usar dos fototransistores con idénticas características, ya que si escogemos diferentes fotoelementos tendríamos que verificar que la sensibilidad de cada uno sea la misma, o que la irradiancia a cada fototransistor sea la adecuada.

**3.3.2 Fototransistores trabajando como compuerta NAND**

Este circuito trata de que dos fototransistores trabajen como una compuerta NAND.

Es decir, el voltaje de salida será un  $1_L$  cuando uno de los fototransistores esté en corte y estará en  $0_L$  cuando los dos fototransistores estén en saturación. Esto sucederá cuando no llegue luz a algún fototransistor y llegue la intensidad de luz adecuada a los dos fototransistores, respectivamente.

En la figura 3.4 podemos observar el circuito a implementar.

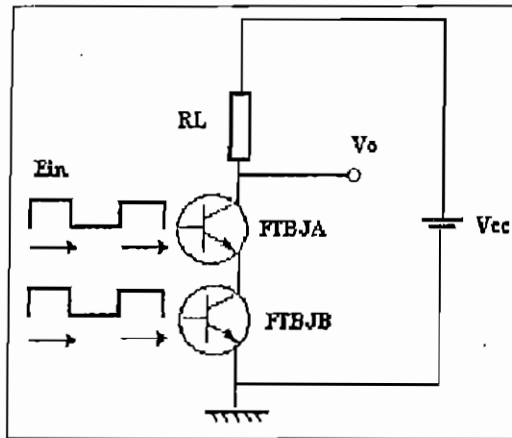


Figura 3.4 Compuerta NAND con dos fototransistores.

Para el diseño de este circuito necesitamos los siguientes datos :

$V_{cc}$  Voltaje de polarización [Voltios]

$V_{CEsat}$  Voltaje colector-emisor de saturación de trabajo [Voltios]

Sea:

$I_c$  Corriente de colector de trabajo [mA]

Esperando obtener los siguientes resultados:

$R_L$  Resistencia de carga [K $\Omega$ ]

$V_o$  Voltaje de salida [Voltios]

**Diseño:**

Con los datos que disponemos calculamos la resistencia de carga, siendo ésta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat, A} - V_{CEsat, B}}{I_c}$$

El máximo (con 1 lógico a la salida) voltaje de salida en la resistencia de carga estará dado por:

$$V_o = V_{cc}$$

**Nota:**

Debemos tener presente de no rebasar ninguna de las especificaciones para los fototransistores, es decir:

Para la determinación del voltaje de polarización del circuito debemos tomar en cuenta que cuando se corta uno de los fototransistores, éste soporta entre el colector y emisor el voltaje de polarización del circuito.

$$V_{CEmáxA} \text{ y } V_{CEmáxB} > V_{cc}$$

donde:

$$V_{CEmáx} = \text{Voltaje colector-emisor máximo del fototransistor} \quad [\text{Voltios}]$$

Como vamos a suponer una corriente de colector de trabajo debemos tomar en cuenta que no supere los límites de la corriente máxima permitida para cada fototransistor.

$$I_c < I_{cmáxA} \text{ y } I_{cmáxB}$$

donde:

$$I_{cmáx} = \text{Corriente de colector máxima del fototransistor} \quad [\text{mA}]$$

### 3.3.3 Fototransistores trabajando como compuerta OR

Este circuito trata de que dos fototransistores trabajen como una compuerta OR.

Es decir, el voltaje de salida será  $1_L$  cuando uno de los fototransistores esté saturado y será  $0_L$  cuando ambos fototransistores estén en corte.

Así mismo, el fototransistor se saturará cuando llegue a éste la potencia óptica adecuada y se cortará cuando no llegue luz al mismo.

En la figura 3.5 podemos observar el circuito a implementar.

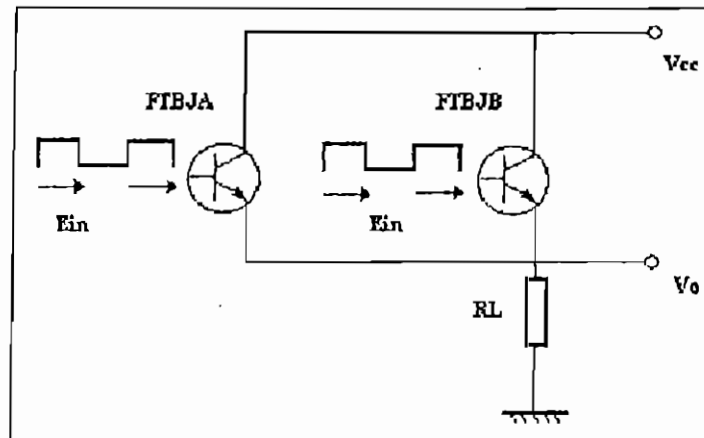


Figura 3.5 Compuerta OR con dos fototransistores.

Para el diseño de este circuito necesitamos los siguientes datos :

Vcc Voltaje de polarización [Voltios]

V<sub>CEsat</sub> Voltaje colector-emisor de saturación de trabajo [Voltios]

Sea:

Ic Corriente de colector de trabajo [mA]

Esperando obtener los siguientes resultados:

R<sub>L</sub> Resistencia de carga [KΩ]

V<sub>o</sub> Voltaje de salida [Voltios]

**Diseño:**

Con los datos que disponemos calculamos la resistencia de carga, siendo ésta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_c}$$

El máximo (con 1 lógico a la salida) voltaje de salida en la resistencia de carga estará dado por:

$$V_o = (R_L \cdot I_c)$$

**Nota:**

Debemos tener presente de no rebasar ninguna de las especificaciones para los fototransistores, es decir:

Para la determinación del voltaje de polarización del circuito debemos tomar en cuenta que cuando se corta uno de los fototransistores, éste soporta entre el colector y emisor el voltaje de polarización del circuito.

$$V_{CEmáxA} \text{ y } V_{CEmáxB} > V_{CC}$$

donde:

$$V_{CEmáx} = \text{Voltaje colector-emisor máximo del fototransistor} \quad [\text{Voltios}]$$

Como vamos a suponer una corriente de colector de trabajo debemos tomar en cuenta que no supere los límites de la corriente máxima permitida para cada fototransistor.

$$I_c < I_{cmáxA} \text{ y } I_{cmáxB}$$

donde:

$$I_{cmáx} = \text{Corriente de colector máxima del fototransistor} \quad [\text{mA}]$$

### 3.3.4 Fototransistores trabajando como compuerta NOR

Este circuito trata de que dos fototransistores trabajen como una compuerta NOR.

Es decir, el voltaje de salida será  $I_L$  cuando ambos fototransistores estén en corte y será  $0_L$  cuando cualquier fototransistor esté en saturación.

Así mismo, el fototransistor se saturará cuando llegue a éste la potencia óptica adecuada y se cortará cuando no llegue luz al mismo.

En la figura 3.6 podemos observar el circuito a implementar.

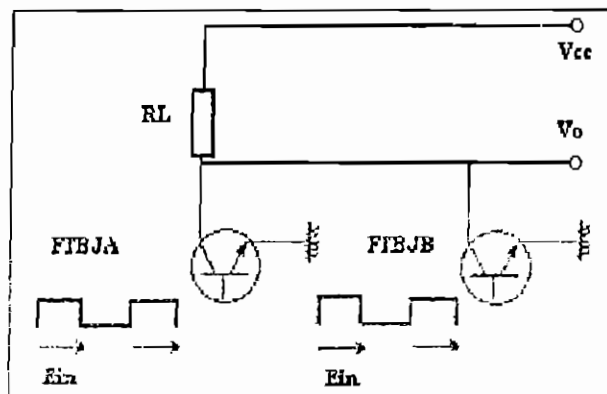


Figura 3. 6 Compuerta NOR con dos fototransistores.



Para el diseño de este circuito necesitamos los siguientes datos :

$V_{CC}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$V_{CEsat}$	Voltaje colector-emisor de saturación de trabajo	[Voltios]
Sea:		
$I_C$	Corriente de colector de trabajo	[mA]

Esperando obtener los siguientes resultados:

$R_L$	Resistencia de carga	[K $\Omega$ ]
$V_o$	Voltaje de salida	[Voltios]

#### Diseño:

Con los datos que disponemos calculamos la resistencia de carga, siendo ésta:

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_C}$$

El máximo (con 1 lógico a la salida) voltaje de salida en la resistencia de carga estará dado por:

$$V_o = V_{CC}$$

#### Nota:

Debemos tener presente de no rebasar ninguna de las especificaciones para los fototransistores, es decir:

Para la determinación del voltaje de polarización del circuito debemos tomar en cuenta que cuando se corta uno de los fototransistores, éste soporta entre el colector y emisor el voltaje de polarización del circuito.

$$V_{CEmáxA} \text{ y } V_{CEmáxB} > V_{CC}$$

donde:

$$V_{CEmáx} = \text{Voltaje colector-emisor máximo del fototransistor} \quad [\text{Voltios}]$$

Como vamos a suponer una corriente de colector de trabajo debemos tomar en cuenta que no supere los límites de la corriente máxima permitida para cada fototransistor.

$$I_C < I_{cmáxA} \text{ y } I_{cmáxB}$$

donde:

$I_{em\acute{a}x}$  = Corriente de colector máxima del fototransistor [mA]

### 3.4 CIRCUITO CON UN FOTOTRANSISTOR EN EMISOR COMUN

Aquí queremos ver que un fototransistor es un elemento muy similar a un transistor, con la diferencia de que el fototransistor aprovecha más la propiedad de generar una fotocorriente. Además el fototransistor puede trabajar en circuitos similares a los que se usa el transistor, como es el caso de un amplificador en emisor común. Es decir, el fototransistor va a generar una corriente de base dependiendo de la magnitud de la irradiancia incidente, con lo que se va a generar un voltaje de entrada en la base del fototransistor proporcional a la magnitud de la luz incidente. Vamos a suponer que el voltaje de entrada generado por la corriente de base es senoidal.

Específicamente este circuito puede usarse como un amplificador de corriente a partir de la luz incidente y como un detector de radiación modulada.

En la figura 3.7 podemos ver el circuito a implementar.

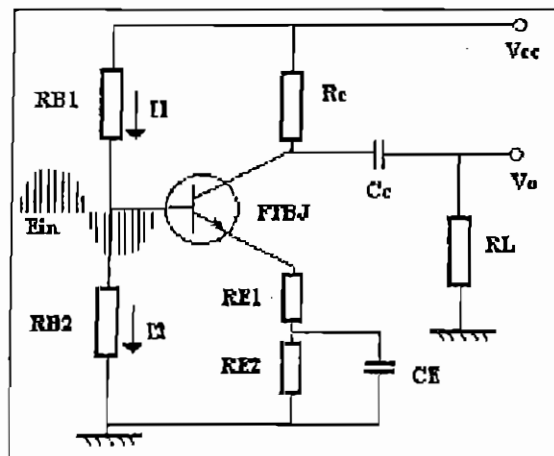


Figura 3. 7 Fototransistor en emisor común para la recepción de la radiación modulada.

Para el diseño de este circuito necesitamos de los siguientes **datos**:

A Ganancia del circuito

Zin Impedancia de entrada [KΩ]

(no es indispensable ingresar el dato de  $Z_{in}$ )

$V_{inp}$	Voltaje de entrada pico	[Voltios]
$R_L$	Resistencia de carga	[K $\Omega$ ]
$\beta_{min}$	$\beta$ del fototransistor	
frec.	Frecuencia del voltaje de entrada	[KHz]

Esperando obtener, como parte del diseño, los siguientes **resultados**:

$V_{cc}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$R_c$	Resistencia de colector	[K $\Omega$ ]
$R_{E1}$	Resistencia de emisor 1	[ $\Omega$ ]
$R_{E2}$	Resistencia de emisor 2	[K $\Omega$ ]
$R_{B1}$	Resistencia de base 1	[K $\Omega$ ]
$R_{B2}$	Resistencia de base 2	[K $\Omega$ ]
$C_c$	Capacitancia de colector	[uF]
$C_E$	Capacitancia de emisor	[uF]

### Diseño:

Como debemos cumplir con cierto valor de impedancia de entrada deberemos aplicar la expresión:

$$R_{eq} \geq Z_{in} \cdot \frac{A}{\beta + 1}$$

donde:

$$R_{eq} = R_L // R_c$$

De la ecuación anterior como conocemos  $R_L$  determinaremos el valor mínimo de la resistencia de colector ( $R_c$ ) que cumple con aquella condición.

Assumiendo a partir de éste un valor apropiado de  $R_c$ , calcularemos el voltaje de polarización sobre la resistencia de colector.

Pero debemos recordar que debemos cumplir con la condición de no recorte de la señal, siendo ésta:

$$I_c \geq i_{op}$$

Entonces calculamos el voltaje de polarización en la resistencia de colector que cumpla con la siguiente condición:

$$V_{Rc} \geq \frac{Rc \cdot vop}{Re q}$$

Con este voltaje y el valor de la resistencia de colector calculamos la corriente de colector de polarización, siendo ésta:

$$Ic = \frac{V_{Rc}}{Rc}$$

también podemos calcular:

$$re = \frac{V_T}{I_B} \approx \frac{25mV}{Ic}$$

A continuación calculamos  $R_{E1}$ , para cumplir con la ganancia que se pide, mediante:

$$R_{E1} = \frac{Re q}{A} - re$$

Ahora calculemos el voltaje de colector-emisor necesario para que no exista distorsión de la señal.

$$V_{CE} = vop + V_{CEreg.} + v_{inp}$$

donde:

$V_{CEreg.}$  = Voltaje de colector-emisor para que el fototransistor trabaje en la región lineal.

Además sabemos que:

$$I_B = \frac{Ic}{\beta_{min}}$$

Ahora para que exista estabilidad de polarización se debe cumplir que:

$$I_2 \gg I_B$$

entonces:

$$I_2 = 10 \cdot I_B$$

Aplicando la ley de corrientes en el circuito:

$$I_1 = I_2 + I_B$$

Observando el circuito obtenemos que:

$$V_{R_{B1}} = V_{Rc} + V_{CE} - V_{BE}$$

con lo que:

$$R_{B1} = \frac{V_{R_{B1}}}{I_1}$$

Así mismo observando el circuito, tenemos una impedancia de entrada:

$$Z_{in} = R_{B1} // R_{B2} // [(\beta+1) \cdot (r_e + R_{E1})]$$

En donde reemplazando los valores de  $Z_{in}$ ,  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ ,  $\beta$ ,  $r_e$  y  $R_{E1}$ , calculamos el valor de la resistencia  $R_{B2}$  mínima necesaria para cumplir con la impedancia de entrada.

Con el valor de  $R_{B2}$  apropiado e  $I_2$ , calculamos el voltaje de base de polarización, siendo éste:

$$V_B = I_2 \cdot R_{B2}$$

El voltaje de emisor debe cumplir que:

$$V_E > (1 + \text{vinp}) \text{ voltios}$$

esto es para que exista una estabilidad térmica en el circuito y no exista un recorte de la señal.

Por la ley de voltajes tenemos:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

de donde:

$$R_{BT} = \frac{V_B}{I_C}$$

Además sabemos que:

$$R_{ET} = R_{E1} + R_{E2}$$

entonces:

$$R_{E2} = R_{ET} - R_{E1}$$

Además por la ley de voltajes tenemos:

$$V_{CC} \geq V_{RC} + V_{CE} + V_E \text{ (para que no existe recorte de la señal ponemos un valor mínimo igual)}$$

Para que los capacitores sean un corto circuito para la señal AC:

$$X_{CC} \ll R_L$$

$$X_{CE} \ll r_e + R_{E1} \text{ y}$$

$$X_{CE} \ll R_{E2}$$

En caso que no se nos pida cumplir con ningún valor de impedancia de entrada, la metodología a seguir sería:

Asumimos un valor de  $R_c$  y con este valor calculamos el valor del voltaje sobre esta resistencia, debiendo cumplir que:

$$V_{Rc} \geq \frac{R_c \cdot v_{op}}{R_{eq}}$$

Ahora calculamos la corriente de polarización de colector mediante:

$$I_C = \frac{V_{Rc}}{R_C}$$

también podemos calcular:

$$r_e = \frac{V_T}{I_B} \approx \frac{25mV}{I_C}$$

A continuación calculamos  $R_{E1}$ , para cumplir con la ganancia que se pide, mediante:

$$R_{E1} = \frac{R_{eq}}{A} - r_e$$

Ahora calculemos el voltaje de colector-emisor necesario para que no exista distorsión de la señal.

$$V_{CE} = v_{op} + V_{CEreg.} + v_{inp}$$

donde:

$V_{CEreg.}$  = Voltaje de colector-emisor para que el fototransistor trabaje en la región lineal.

Además sabemos que:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{min}}$$

Ahora para que exista una estabilidad de polarización se debe cumplir que:

$$I_2 \gg I_B$$

entonces:

$$I_2 = 10 \cdot I_B$$

Aplicando la ley de corrientes en el circuito:

$$I_1 = I_2 + I_B$$

Asumimos el valor del voltaje de emisor ( $V_E$ ), cumpliendo la condición necesaria para que exista estabilidad térmica y no exista recorte de la señal.

$$V_E \geq 1 + v_{inp}$$

De allí podemos calcular:

$$R_{E1} = \frac{V_B}{I_B}$$

Con lo que podemos determinar  $R_{E2}$ , siendo ésta:

$$R_{E2} = R_{E1} - R_{E1}$$

Por ley de voltajes vemos que el voltaje de base es:

$$V_B = V_E + 0.6$$

A continuación calculamos el voltaje de polarización del circuito, mediante:

$$V_{CC} \geq V_{RC} + V_{CE} + V_E$$

(ese valor mínimo igual del voltaje de polarización es para que no exista recorte de la señal)

Luego determinamos la resistencia de base 2, siendo ésta:

$$R_{B2} = \frac{V_B}{I_2} = \frac{V_B + 0.6}{I_2}$$

Por último calculamos la resistencia de base 1, mediante:

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_1}$$

### 3.5 CIRCUITO BASICO CON FOTO-SCR

Una de las aplicaciones más usadas para los foto-SCR es para la generación de impulsos. Resultan útiles en contadores, o para selección, marcado, y en general, en la resolución de ciertos problemas de automática.

Es lo que hacen dos circuitos de nuestro diseño uno genera un impulso positivo y el otro un impulso negativo cuando llega la irradiancia adecuada al foto-SCR.

#### 3.5.1 Circuito básico con Foto-SCR. Generador de impulso positivo

El circuito de la figura 3.8 está normalmente en la oscuridad y C está cargada. Cuando se ilumina el fototiristor, el condensador se descarga sobre R<sub>2</sub> y se puede ver sobre esta resistencia el pulso positivo que deseamos generar. La señal de salida es independiente del valor de la irradiancia.

En la figura 3.8 podemos observar el circuito a implementar.

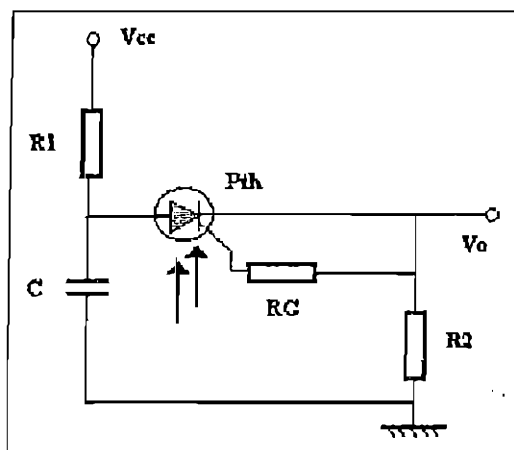


Figura 3. 8 Foto-SCR en la generación de pulso positivo.

En el diseño de este circuito intervienen los siguientes datos :

$V_{cc}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$V_{mín}$	Voltaje mínimo de descarga del capacitor	[Voltios]
$V_{máx}$	Voltaje máximo de carga del capacitor	[Voltios]
$t_1$	Tiempo de no incidencia de luz en el fototiristor	[ms]
$t_2$	Tiempo de incidencia de luz en el fototiristor	[ms]
Sea:		
$i$	Corriente que circula por el fototiristor	[mA]

Obteniendo los siguientes **resultados**:

$R_1$	Resistencia 1 del circuito	[K $\Omega$ ]
$R_2$	Resistencia 2 del circuito	[K $\Omega$ ]
$C$	Capacitor del circuito	[uF]

#### Diseño:

Cuando llega luz a la compuerta del fototiristor éste se dispara con lo que debemos poner una resistencia de protección de la corriente que circula a través de éste.

$$R_2 = \frac{V_{cc}}{i}$$

Como el capacitor se descarga a través de  $R_2$  usamos la relación dada para un circuito RC y calculamos este capacitor en función al tiempo de descarga que queremos en el impulso.

$$C = \frac{R_2}{\ln \left[ \frac{V_{max}}{V_{min}} \right]}$$

Cuando el fototiristor está en la oscuridad tenemos que el capacitor se carga a través de  $R_1$  y usando la relación de carga de un circuito RC calculamos la resistencia de carga  $R_1$  en función del tiempo de carga que deseamos para el capacitor.



$$R_1 = \frac{t_1}{C \cdot \ln \left[ \frac{V_{CC} - V_{min}}{V_{CC} - V_{max}} \right]}$$

Para el cálculo de  $R_G$ , debemos tomar un valor que impida que se dispare el foto-SCR en forma espontánea, para lo cual cumplimos que:

$$R_G \gg R_{GC}$$

donde:

$R_{GC}$  = resistencia compuerta-cátodo del foto-SCR

Nota:

Debemos tomar en cuenta de no rebasar ninguna de las especificaciones para el fototiristor, como por ejemplo:

$$i < i_{m\acute{a}x}$$

donde:

$$i_{m\acute{a}x} = \text{Corriente máxima que soporta el fototiristor} \quad [\text{mA}]$$

### 3.5.1 Circuito básico con foto-SCR generador de impulso negativo

En el circuito de la figura 3.9 el fototiristor está normalmente iluminado, y deja pasar una corriente que al atravesar  $R_1$  impide que se cargue  $C$ . Si se interrumpe esta iluminación,  $C$  se carga al valor de la tensión de polarización. El restablecimiento de la iluminación permitirá a  $C$  descargarse, con lo que aparecerá un impulso negativo a la salida.

En la figura 3.9 podemos observar el circuito a implementar.

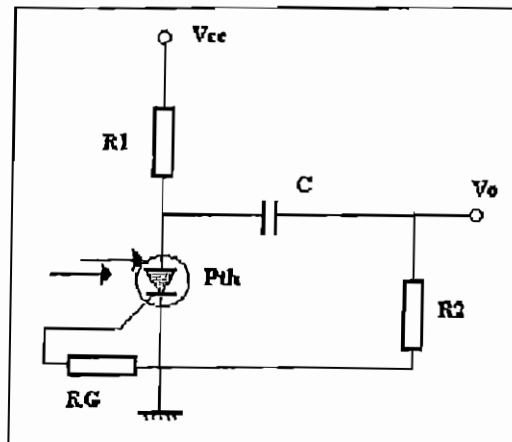


Figura 3.9 FotoSCR en la generación de pulso negativo.

Los **datos** que vamos a ingresar para el diseño de este circuito son:

$V_{cc}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$V_{mín}$	Voltaje mínimo de descarga del capacitor	[Voltios]
$V_{máx}$	Voltaje máximo de carga del capacitor	[Voltios]
$t_1$	Tiempo de no incidencia de luz en el fototiristor	[ms]
$t_2$	Tiempo de incidencia de luz en el fototiristor	[ms]
Sea:		
$i$	Corriente que circula por el fototiristor	[mA]

Con lo que vamos a obtener los siguientes **resultados**:

$R_1$	Resistencia 1 del circuito	[K $\Omega$ ]
$R_2$	Resistencia 2 del circuito	[K $\Omega$ ]
$C$	Capacitor del circuito	[ $\mu$ F]

#### Diseño:

Cuando llega luz al fototiristor este se dispara con lo que debemos poner una resistencia de protección de la corriente que circula a través de éste.

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{i}$$

Cuando el fototiristor está en la oscuridad tenemos que el capacitor se carga a través de  $R_1$  y  $R_2$ , entonces usando la relación de carga de un circuito RC calculamos la resistencia de carga  $R_2$  en función del tiempo de carga que deseamos para el capacitor.

$$R_2 = \frac{R_1}{\left[ \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{\ln \left[ \frac{V_{max}}{V_{min}} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{cc} - V_{min}}{V_{cc} - V_{max}} \right]} \right] - 1}$$

Como el capacitor se descarga a través de  $R_2$  usamos la relación dada para un circuito RC y calculamos este capacitor en función al tiempo de descarga que queremos en el impulso.

$$C = \frac{t_2}{R_2 \cdot \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}$$

Para el cálculo de  $R_G$ , debemos tomar un valor que impida que se dispare el foto-SCR en forma espontánea, para lo cual cumplimos que:

$$R_G \gg R_{GC}$$

donde:

$R_{GC}$  = resistencia compuerta-cátodo del foto-SCR

**Nota:**

Debemos tomar en cuenta de no rebasar ninguna de las especificaciones para el fototiristor, como por ejemplo:

$$i < i_{m\acute{a}x}$$

donde:

$$i_{m\acute{a}x} = \text{Corriente máxima que soporta el fototiristor} \quad [\text{mA}]$$

### 3.6 CIRCUITO BASICO CON FOTOTRIAC

Con este circuito se trata de ver la relación entre la frecuencia de incidencia en un fototriac con la frecuencia del voltaje alterno que cae en una resistencia.

Una de las aplicaciones que puede tener este circuito es como un control de temperatura con constantes de tiempo muy grandes. También se lo puede usar como un control de ciclo integral, si sincronizamos el cruce por cero de la señal alterna con el inicio de la incidencia de luz.

En la figura 3.10 podemos ver el circuito a implementar.

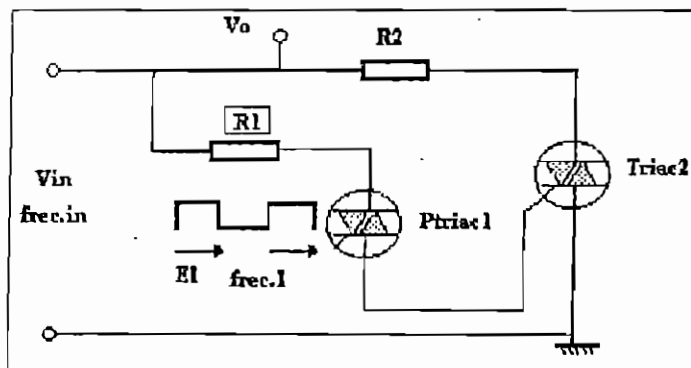


Figura 3. 10 Conexión de un FotoTriac para activar un Triac de potencia.

Los datos necesarios para el diseño de este circuito son:

$V_{pin}$	Voltaje pico de entrada	[Voltios]
$I_{GTmín}$	Corriente de compuerta mínima del triac	[mA]
Sea:		
$i_2$	Corriente que circula por el triac	[mA]

Entonces obtenemos los siguientes resultados:

$R_1$	Rango en el cual puede estar la resistencia 1 del circuito	[KΩ]
$R_2$	Resistencia 2 del circuito	[KΩ]

**Diseño:**

Con los datos que disponemos calculamos:

Dependiendo de la aplicación que le vayamos a dar al circuito podemos conocer el valor de la resistencia de carga  $R_2$ , ó asumir un valor de corriente que deseamos que circule por el triac, en cualquier caso nosotros elegiremos el triac para que soporte la corriente que va a circular por éste. Entonces calculamos la resistencia de carga mediante:

$$R_2 = \frac{V_{pin}}{i}$$

Para proteger al fototriac colocamos una resistencia  $R_1$ .

$$R_1 \geq \frac{V_{pin}}{i_{máx1}}$$

donde:

$$i_{máx1} = \text{Corriente máxima que soporta el fototriac} \quad [\text{mA}]$$

Para asegurar el disparo del triac:

$$R_1 \leq \frac{V_{pin}}{I_{GTmin 2}}$$

**Nota:**

Para proteger a los tiristores contra quemaduras por voltaje tomamos en cuenta que:

$$2 \cdot V_{pin} < \min(V_{ppmáx1}, V_{ppmáx2})$$

$$i_2 < i_{m\acute{a}x2}$$

donde:

$$V_{ppm\acute{a}x1} = \text{Voltaje pico-pico m\acute{a}ximo que soporta el fototriac} \quad [\text{Voltios}]$$

$$V_{ppm\acute{a}x2} = \text{Voltaje pico-pico m\acute{a}ximo que soporta el triac} \quad [\text{Voltios}]$$

$$i_{m\acute{a}x2} = \text{Corriente m\acute{a}xima que soporta el triac} \quad [\text{mA}]$$

### 3.7 CIRCUITO BASICO CON UN IRED ALIMENTADO CON UNA SEÑAL SENOIDAL

En este circuito observamos lo que sucede cuando alimentamos un diodo luminiscente con una se\u00f1al alterna.

Esta clase de circuito sirve para la transmisi\u00f3n de una se\u00f1al el\u00e9ctrica positiva a trav\u00e9s de la luz, tambi\u00e9n se lo puede usar como un circuito de sincronismo para otro circuito en el que puede existir un fototransistor que recepte la se\u00f1al. Es decir, seg\u00fan el valor de corriente que circule por el diodo luminiscente vamos a tener un determinado valor de potencia luminosa.

En definitiva este circuito es un control de un diodo luminiscente con corriente alterna.

En la figura 3.11 podemos observar el circuito a dise\u00f1ar.

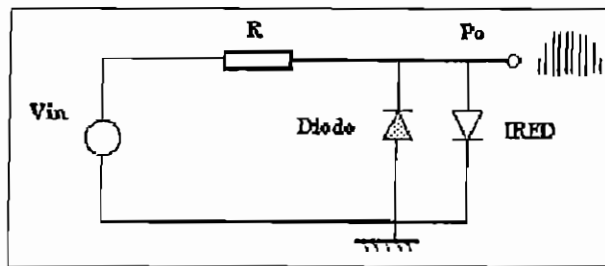


Figura 3.11 Control e un diodo luminiscente con corriente alterna.

Para el dise\u00f1o necesitamos de los siguientes **datos**:

$V_{pin}$	Voltaje pico de alimentaci\u00f3n	[Voltios]
$V_{F(IRED)}$	Voltaje de operaci\u00f3n del IRED	[Voltios]
$P_{pico}$	Flujo radiante pico de salida	[mW]

Queriendo obtener los siguientes **resultados**:

R	Resistencia del circuito	[KΩ]
$i_{pico}$	Corriente pico que circula por el circuito	[mA]

**Diseño:**

En esta clase de circuito se escoge el elemento, entonces con las especificaciones del elemento calculamos:

$$m = \frac{P(imax)}{i_{max}}$$

donde:

$$i_{m\acute{a}x(IRED)} = \text{Corriente m\acute{a}xima que soporta el IRED} \quad [mA]$$

$$P(im\acute{a}x) = \text{Flujo radiante m\acute{a}ximo de salida del IRED} \quad [mW]$$

Ahora para saber cual debe ser la corriente pico que circula en el circuito para obtener la potencia \u00f3ptica deseada, usamos la relaci\u00f3n:

$$i_{pico} = \frac{P_{pico}}{m}$$

Para determinar la resistencia que limita la corriente que circula en el circuito usamos la ecuaci\u00f3n:

$$R = \left[ \frac{V_{pin} - V_{F1}}{i_{pico}} \right]$$

**Nota:**

Para escoger el IRED a comprar debemos tomar en cuenta que:

$$i_{pico} < i_{m\acute{a}x(IRED)}$$

### 3.8 CIRCUITO BASICO DE MODULACION DE UNA SE\u00d1AL SENOIDAL CON IRED

Se trata de dise\u00f1ar un circuito modulador de una se\u00f1al senoidal con un IRED.

Es decir, se va modular la se\u00f1al que queremos transmitir con la amplitud de la luz enviada por el di\u00f3do luminiscente. Aqu\u00ed vamos a aprovechar la caracter\u00edstica lineal que tienen estos elementos.

En la figura 3.12 vemos el circuito a implementar.

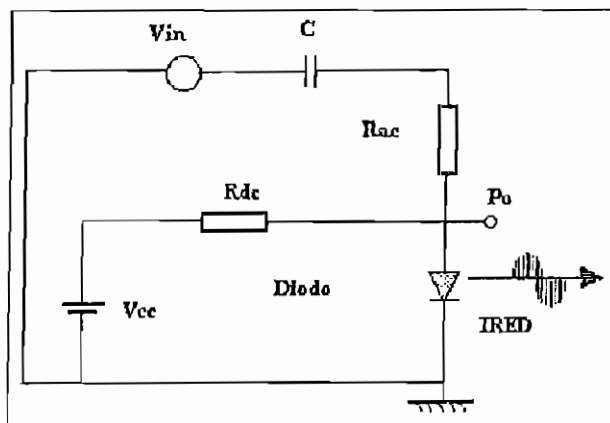


Figura 3.12 Transmisor IR modulado en amplitud.

Los **datos** que necesitamos para el diseño de este circuito son:

$V_{inp}$	Voltaje de entrada pico	[Voltios]
$f_{in}$	Frecuencia del voltaje de entrada	[KHz]
Sea:		
$V_{Ftrab}$	Voltaje DC de trabajo del IRED	[Voltios]
$I_{Ftrab}$	Corriente DC de trabajo del IRED	[mA]
$v_{Fptrab}$	Voltaje AC de trabajo del IRED	[Voltios]
$i_{acp}$	Corriente pico alterna para el punto de trabajo $v_{Fp}$ seleccionado.	[mA]

Con lo que vamos a obtener los siguientes **resultados**:

$V_{cc}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$R_{ac}$	Resistencia ac del circuito	[K $\Omega$ ]
$R_{dc}$	Resistencia dc del circuito	[K $\Omega$ ]
$C$	Capacitor del circuito	[ $\mu$ F]
$r_{av}$	resistencia average del IRED	[K $\Omega$ ]

**Diseño:**

Como vamos a diseñar un modulador, lo que vamos a calcular son los valores de resistencia que hacen que la señal modulada de luz no se recorte.

Según las especificaciones que encontramos en el manual, asumimos los puntos en los que deseamos que trabaje el IRED.

Sea  $V_F = V_F$  de trabajo del IRED

Sea  $I_F = I_F$  de trabajo del IRED

Para que no se recorte la señal, el voltaje de polarización debe ser:

$$V_{CC} > V_F + V_{inP}$$

El cálculo de la resistencia DC se lo hace como si fuese un simple circuito con LED.

$$R_{dc} = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

La resistencia promedio de un diodo luminiscente se la calcula de la misma manera que en un diodo normal.

$$r_{av} = \frac{(V_{Fmax} - V_F)}{(i_{maxDC} - I_F)}$$

donde:

$V_{Fm\acute{a}x}$  = Voltaje de operación máximo del IRED [Voltios]

$i_{m\acute{a}xDC}$  = Corriente máxima DC que soporta el IRED [mA]

Ahora el cálculo de la resistencia  $R_{ac}$  se hace igual que con la recta de carga de un diodo, es decir, mediante la ecuación:

$$R_{ac} = \frac{V_{inP} - v_{FP}}{i_{acP}}$$

donde:

$i_{acP}$  = corriente pico alterna para el punto de trabajo  $v_{FP}$  seleccionado.

Para que el capacitor sea un circuito abierto para la señal DC y corto circuito para la señal AC, se hace que:

$$X_c \ll R_{ac}$$



### 3.9 CIRCUITO BASICO DEMODULADOR CON FOTODIODO

Se intenta diseñar un circuito demodulador de una señal de luz con un fotodiodo.

Es decir, según la irradiancia que llegue al fotodetector se generará una fotocorriente proporcional al valor de la amplitud de luz que llega.

En la figura 3.13 podemos observar el circuito a implementar.

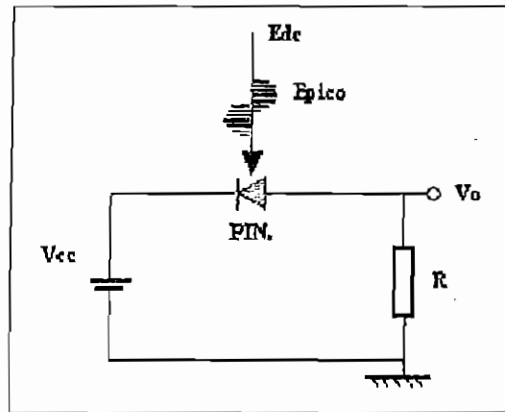


Figura 3. 13 Circuito básico demodulador.

Para el diseño de este circuito necesitamos de los siguientes **datos**:

Vcc	Voltaje de polarización	[Voltios]
fin	Frecuencia de incidencia de la irradiancia	[MHz]
Ci	Capacitancia interna del fotodiodo	[pF]
Sea:		
IDC	Corriente de trabajo del fotodiodo	[mA]

Para obtener los siguientes **resultados**:

R	Resistencia del circuito	[KΩ]
---	--------------------------	------

**Diseño:**

Para que la sensibilidad del fotoelemento no se vea superada aplicamos la relación:

$$R \leq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{in} \cdot C_i}$$

Aquí también recurriremos a las especificaciones del manual para la elección de la corriente de trabajo del fotodiodo ( $I_{DC}$ ), que será la que nos evite los recortes de la señal incidente.

**Nota:**

Para la elección del fotodiodo debemos tomar en cuenta que:

$$E_{m\acute{a}x} > E_{pin}$$

$$V_R > V_{cc}$$

donde:

$$V_R = \text{Voltaje de ruptura inverso del fotodiodo} \quad [\text{Voltios}]$$

$$E_{m\acute{a}x} = \text{Irradiancia máxima del fotodiodo} \quad [\text{mW/cm}^2]$$

$$E_{pin} = \text{Irradiancia pico de incidencia al fotodiodo} \quad [\text{mW/cm}^2]$$

### 3.10 CIRCUITO BASICO MODULADOR DE ONDA CUADRADA CON UN IRED

Se trata de diseñar un circuito modulador de pulsos para el manejo de un diodo luminiscente.

Es decir, cuando el transistor se corta el IRED emite una determinada potencia luminosa, mientras que cuando el transistor se satura el diodo luminiscente no emite luminosidad alguna, con lo que estaríamos generando una onda cuadrada de luz.

En la figura 3.14 podemos observar el circuito a diseñar.

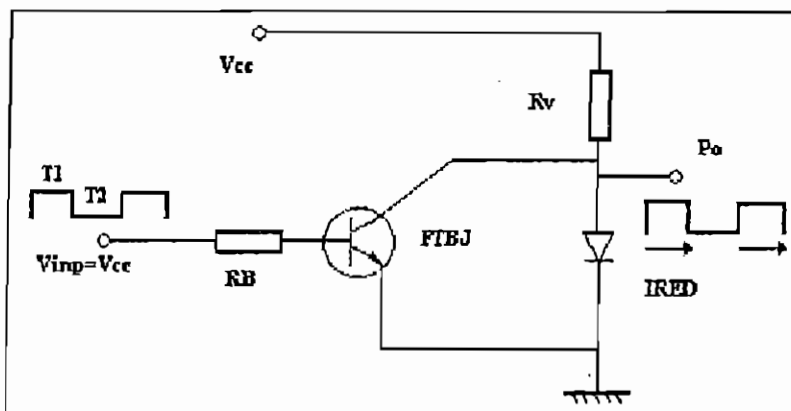


Figura 3.14 Circuito modulador de pulsos para el manejo de diodos luminiscentes.

Para el diseño necesitamos de los siguientes datos:

$V_{CC}$	Voltaje de polarización	[Voltios]
$V_F$	Voltaje de operación del IRED	[Voltios]
$P_o$	Flujo radiante de salida a transmitir	[mW]
$\beta_{min}$	Ganancia mínima del transistor	

Esperando obtener los siguientes resultados:

$R_V$	Resistencia de colector del circuito	[K $\Omega$ ]
$R_B$	Resistencia de base del circuito	[K $\Omega$ ]
$I_F$	Corriente de operación del IRED	[mA]

**Diseño:**

Esta clase de circuito se usa para la transmisión de información a través de fibra óptica para lo cual por lo general tenemos como dato la potencia óptica que necesitamos generar.

Entonces necesitamos calcular la corriente que debe circular por el IRED para generar esta potencia óptica.

$$I_C = \frac{P_o}{m} = I_F$$

donde:

$$m = \frac{P_{max}}{I_{max}}$$

donde:

$$P_{m\acute{a}x} = \text{Potencia m\acute{a}xima radiante del IRED} \quad [mW]$$

$$I_{m\acute{a}x} = \text{Corriente m\acute{a}xima que soporta el IRED} \quad [mW]$$

Luego calculamos la resistencia de protección del IRED.

$$R_V = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

Sabemos que para un transistor en saturación se cumple que:

$$I_B = \frac{2 \cdot I_C}{\beta_{min}}$$

Entonces calculamos la resistencia de base:

$$R_B = \frac{V_B - V_{BE}}{I_B} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$$

donde:

$V_B$  = Voltaje de base

$V_{BE}$  = Voltaje de base-emisor

### 3.11 CIRCUITO ACOPLADOR DE FAMILIAS DIGITALES CON UN OPTOACOPLADOR

Una muy usual aplicación de los optoacopladores es como interfaz entre diferentes familias lógicas digitales.

Es decir, como en las familias digitales existe un rango permitido de voltaje, tanto para  $I_L$  como para  $O_L$ , es necesario calcular las resistencias que permiten que no nos salgamos de ese rango, ya que hay que tomar en cuenta que toda resistencia tiene una tolerancia, o sea, no se conoce el valor exacto de una resistencia.

En la figura 3.15 podemos ver el circuito a implementar.

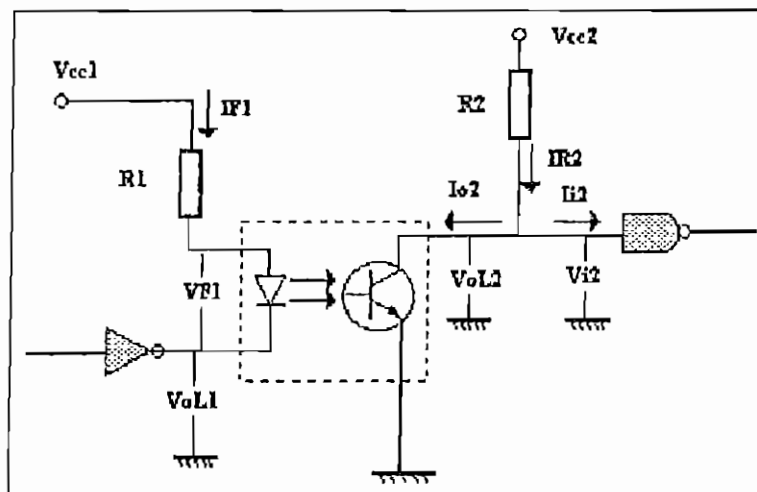


Figura 3.15 Circuito de interfaz con optoacoplador.

Para el diseño de este circuito necesitaremos los siguientes datos de los elementos:

$V_{cc1}$	Voltaje de polarización de la fuente 1	[Voltios]
$tol_1$	Tolerancia de la fuente 1	[%]
$I_{F1typ}$	Corriente típica de operación del IRED del optoacoplador	[mA]
$V_{F1m\acute{a}x}$	Voltaje de operación máximo del IRED del optoacoplador	[Voltios]

$V_{F1typ}$	Voltaje de operación típico del IRED del optoacoplador	[Voltios]
$V_{F1mín}$	Voltaje de operación mínimo del IRED del optoacoplador	[Voltios]
$V_{OL1máx}$	Voltaje de salida LOW máximo del circuito digital de entrada	[Voltios]
$V_{OL1yp}$	Voltaje de salida LOW típico del circuito digital de entrada	[Voltios]
$V_{OL1mín}$	Voltaje de salida LOW mínimo del circuito digital de entrada	[Voltios]
CTR	Relación de transferencia del optoacoplador	[%]
$V_{CC2}$	Voltaje de polarización de la fuente 2	[Voltios]
$tol_2$	Tolerancia de la fuente 2	[%]
$tol$ de R	Tolerancia de las resistencias	[%]
$V_{iL2máx}$	Voltaje de entrada LOW máximo del circuito digital de salida	[Voltios]
$V_{oL2máx}$	Voltaje de salida LOW máximo del circuito digital de salida	[Voltios]
$V_{iH2mín}$	Voltaje de entrada HIGH mínimo del circuito digital de salida	[Voltios]
$I_{iL2máx}$	Corriente máxima LOW de entrada del circuito digital de salida	[mA]
$I_{iH2máx}$	Corriente máxima HIGH de entrada del circuito digital de salida	[mA]
$I_{oH2máx}$	Corriente máxima HIGH de salida del circuito digital de salida	[mA]

Obteniendo los siguientes resultados:

$R_1$	Resistencia 1 del circuito	[K $\Omega$ ]
$R_2$	Rangos para la resistencia $R_2$ del circuito	[K $\Omega$ ]
$I_{F1máx}$	Corriente máxima de operación del IRED del optoacoplador	[mA]
$I_{F1mín}$	Corriente mínima de operación del IRED del optoacoplador	[mA]

### Diseño:

Aquí vamos a diseñar las resistencias que hacen que los dos elementos digitales se acoplen perfectamente.

En este circuito ya debemos escoger los elementos a usar y con sus especificaciones realizar el diseño.

El primer paso en el diseño consiste en la selección de la corriente de adelanto  $I_F$  que circula a través del emisor del optoacoplador, entonces del circuito sacamos que:

$$R_1 = \frac{V_{CC1} - V_{F1typ} - V_{OL1typ}}{I_{F1typ}}$$

Escojo un valor estándar de  $R_1$

Según la tolerancia que tenga la resistencia escogida, tenemos:

$$R_{1max} = R_1 \left[ 1 + \frac{tol}{100} \right]$$

$$R_{1min} = R_1 \left[ 1 - \frac{tol}{100} \right]$$

Ahora podemos determinar la máxima y mínima corriente a circular por el diodo luminiscente, del circuito obtenemos que:

$$I_{F1max} = \frac{V_{CCmax} - V_{F1min} - V_{OL1min}}{R_{1min}}$$

$$I_{F1min} = \frac{V_{CCmin} - V_{F1max} - V_{OL1max}}{R_{1max}}$$

La corriente de salida del acoplador depende de la relación de transferencia del dispositivo (CTR), entonces sabemos que:

$$I_{OL2max} = \frac{CTR}{100} \cdot I_{F1min}$$

Así mismo podemos ahora calcular los valores de resistencia máximo y mínimo para el circuito receptor, observando el circuito obtenemos:

$$R_{2min} = \frac{V_{CC2max} - V_{OL2max}}{I_{OL2max} + I_{I2max}}$$

El máximo valor de resistencia es determinado en la condición que existe cuando el transistor de salida del optoacoplador está en estado de off (bajo ó 0 lógico) por lo tanto:

$$R_{2max} = \frac{V_{CC2min} - V_{I2min}}{I_{O2max} + I_{I2max}}$$

#### Nota:

Siempre debemos tomar en cuenta de no rebasar ninguna de las especificaciones para todos los elementos usados en los diferentes circuitos.

## CAPITULO IV

### COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

- Con este trabajo se logró el objetivo planteado al inicio, que es tener una herramienta de trabajo didáctica para los estudiantes que deseen aprender el funcionamiento de los principales elementos optoelectrónicos. Además este programa presta muchas facilidades, siendo las más importantes:

Es un programa que se puede instalar fácil y rápidamente, puede ejecutarse en cualquier computador que sea como mínimo un modelo 386. Esto ayuda a que el software elaborado esté al alcance de casi toda persona que desee aprender con este tutorial.

Además para realizar correcciones o futuras ampliaciones a la aplicación desarrollada basta con ingresar la clave de acceso (para entrar al nivel de autor) del programa para realizar los cambios en el mismo.

- Hay que darse cuenta que el desarrollo de programas computacionales con aplicaciones Multimedia se ha logrado implementar en forma práctica debido a la actual tecnología, logrando que cualquier usuario puede disfrutar de estos beneficios sin tener una idea clara de como funcionan estos programas.
- Además la versatilidad que presentan los paquetes multimedia permiten realizar no solamente aplicaciones orientadas a Optoelectrónica, sino que pueden ser desarrolladas para cualquier materia (o aplicación en general). En un futuro se podría de alguna manera pensar en la educación a distancia (principalmente en materias en

las cuales no se tiene Laboratorio), un punto de apoyo fundamental podría ser el INTERNET (siendo esta una gigantesca red y gracias principalmente a los servicios que presta la comunicación se vuelve asombrosamente rápida).

- También una de las aplicaciones más importantes que puede tener este trabajo es como ayuda para los estudiantes que pueden asistir a la Facultad sólo en determinadas horas, debido a que trabajan o que realizan alguna otra actividad, pudiendo estudiar la materia (por ejemplo la materia de Comunicaciones ópticas ó el último capítulo que se ve en *Electrónica III*) en cualquier lugar en el que se disponga un computador.
- En cuanto al diseño de circuitos con elementos optoelectrónicos debemos darnos cuenta que el procedimiento de diseño es análogo a los circuitos en los que sólo existen elementos electrónicos, tomando en cuenta que aquí existe una variable más que interviene que es la emisión o incidencia de radiación en los transmisores y receptores ópticos, respectivamente. Es decir, un fototransistor va a tener curvas características similares a las que tiene un transistor, con la diferencia que aquí tenemos una irradiancia incidente que generará una corriente de base, esta relación (entre corriente de base y radiación incidente) también tendrá una curva característica que vendrá detallada en los manuales.
- El Módulo de Diseño y Simulación se lo ha hecho lo más didáctico posible, para que el usuario pueda entender fácilmente como interviene y afecta la radiación (ó luz), emitida o incidente, a los diferentes circuitos diseñados en este módulo.
- Una de las enseñanzas más importantes aprendida en el desarrollo de esta Tesis es que el descubrimiento y estudio de los semiconductores ha sido la verdadera revolución de la electrónica de este siglo, ya que casi un 90% (o más) de los elementos electrónicos y optoelectrónicos más usados en la actualidad tiene como base para su fabricación el diodo semiconductor tipo P y/o tipo N.



- Al leer sobre los diferentes elementos optoelectrónicos (principalmente fibras ópticas), me he dado cuenta que el futuro de las comunicaciones está en la transmisión de la información a través de la fibra óptica, debido principalmente a su gran ancho de banda, llegando al punto de que en la actualidad se están usando a los satélites como medios emergentes de transmisión, es decir, la información se envía por medio de fibra pero sólo en caso de que algo falle en este medio de transmisión se usará el satélite.

Además los últimos estudios (como por ejemplo los amplificadores ópticos y la modulación en frecuencia de la luz) en este campo han permitido que el estudio de la Optoelectrónica se vuelva de gran importancia en los estudiantes que siguen esta carrera.

- Se espera que este trabajo no quede en el olvido y que de alguna manera contribuya a los estudiantes para el aprendizaje de la Optoelectrónica, recomendándose que si se hace una futura ampliación de este programa se la haga basada en los siguientes puntos:

Se recomienda que el Módulo de Teoría se lo complete con una explicación más detallada de las características y especificaciones que uno encuentra en los diferentes manuales usados para la descripción de los elementos optoelectrónicos.

Para el Módulo de Diseño y Simulación sería conveniente comprar un simulador de elementos optoelectrónicos (especialmente de fibras ópticas) para integrar una opción en la que se puede usar este simulador comercial en el programa (con la ayuda económica de facultad).

En general se podría también seguirse mejorando los detalles llamativos del programa, para hacerlo más didáctico.

## BIBLIOGRAFIA

1. AEG-TELEFUNKEN : "Optoelektronische Bauelemente", Serienprodukte, Berlin, 1979.
2. BAWES, Peter : "Telecomunicación Óptica", Siemens, Barcelona, 1989.
3. BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis : "Electrónica: Teoría de Circuitos", 6<sup>ta</sup> ed., Prentice Hall, México, 1997.
4. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto : "Fundamentos de Electricidad", Limusa, México, 1990.
5. FLOYD, Thomas : "Dispositivos Electrónicos", 3<sup>ra</sup> ed., Limusa, México, 1996.
6. HEWLETT PACKARD : "Optoelectronics: Fiber optics applications manual", 2<sup>da</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1981.
7. HORENSTEIN, Mark N. : "Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos", 2<sup>da</sup> ed., Prentice Hall, México, 1997.
8. LILEN, H. : "Tiristores y Triacs: principios y aplicaciones de los tiristores", Marcombo, Barcelona, 1981.
9. MAHLKE, Gunther y GOSSING, Peter: "Conductores de fibras ópticas", Marcombo, Barcelona, 1987.
10. MORRIS, Noel : "Electrónica Moderna: Fundamentos y sus aplicaciones a la electricidad", 3<sup>ra</sup> ed., Parainfo, Madrid, 1985.
11. MUNDO ELECTRONICO, MOMPIN, José : "Microprocesadores y Microcomputadores", 2<sup>da</sup> ed., Marcombo, Barcelona, 1984.

12. MUNDO ELECTRONICO, MOMPIN, José : "Transductores y medidores electrónicos", 2<sup>da</sup> ed., Marcombo, Barcelona, 1984.
13. NTE : "Technique guide and cross reference .Manual", NTE, New Jersey, 1985.
14. RUBIO, Baltasar : "Introducción a la Ingeniería de la fibra óptica", Addison-Wesley, Buenos Aires, 1994.
15. SANCHEZ, Tarquino A. : " Electrónica III", E.P.N., Quito, 1995.
16. SIEMENS : "Componentes electrónicos: descripción técnica y características para estudiantes", Marcombo, Barcelona, 1987.
17. SPATH, Werner y JAKOWETZ, Wolf : "Optoelectrónica: Componentes optoelectrónicos" , Siemens, Barcelona, 1989.
18. TEXAS INSTRUMENTS : "Optoelectronics and image sensor data book. Manual", Texas Instruments, Texas, 1987.
19. TEXAS INSTRUMENTS : "OPTOELECTRONICS: Theory and Practice", McGraw-Hill Book Company, United States, 1978.
20. TUR TERRASA, Juan y MARTINEZ J., Rosario : "Todo sobre las fibras ópticas", Marcombo, Barcelona, 1989.
21. USBECK WANDEMBERG, Carlos : "Diseño de Redes de Fibra Óptica", ESPE, Quito, 1994.
22. VANCEK, Eligius : "Sistemas de comunicación a través de fibras ópticas", Universidad de Santiago de Chile, Santiago, 1986.
23. VILLEGAS, Margarita : "Principio de Comunicaciones Ópticas", ESPE, Quito, 1994.

**Publicaciones:**

- Publicaciones CEKIT S.A., Electrónica & Computadores, "Proyectos, tecnología, aplicaciones prácticas y teoría", Colombia, N° 15.
- Publicaciones CEKIT S.A., Electrónica & Computadores, "Proyectos, tecnología, aplicaciones prácticas y teoría", Colombia, N° 16.
- Publicaciones CEKIT S.A., Electrónica & Computadores, "Proyectos, tecnología, aplicaciones prácticas y teoría", Colombia, N° 17.

## ANEXO 1

- **Muestras gráficas de las pantallas del módulo de Diseño y Simulación.**

## VL1 Diseño y Simulación de 1 circuito con 3 diodos Led's en serie y en paralelo.-

### DATOS:

Volios	ra.á
VF1: 1.2	iLED1: 10
VF2: 1.2	iLED2: 11
VF3: 1.2	iLED3: 10
VF4: 1	iLED4: 10
VF5: 1	iLED5: 12
VF6: 1	iLED6: 9
Vcc: 12	Volios

### Datos del elemento:

mA	mA
P1máx: 100	imáxDC1: 3
P2máx: 330	imáxDC2: 11
P3máx: 200	imáxDC3: 14
P4máx: 80	imáxDC4: 13
P5máx: 70	imáxDC5: 13
P6máx: 50	imáxDC6: 12

### RESULTADOS:

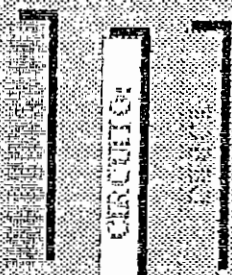
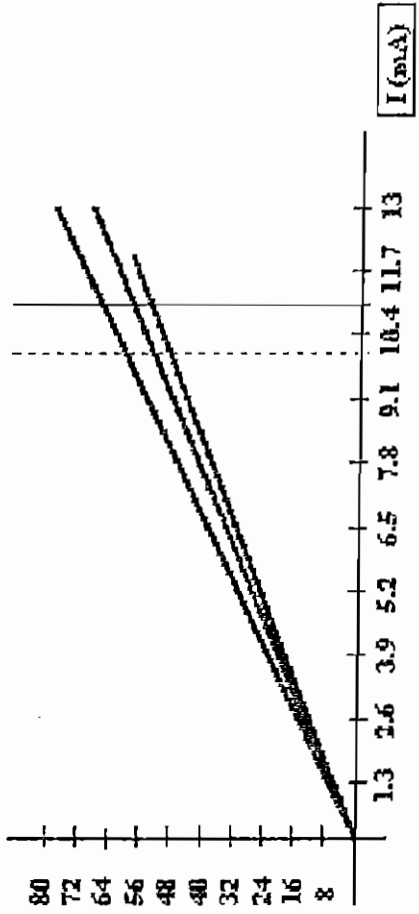
R1: 0.8-400	R1stándart: 0.8Z	Kohms
R2: 0.9	R2stándart: 0.8Z	Kohms
Calcular	Reset	

Simulación de la rama 1. E vs. I

Simulación de la rama 2. E vs. I

P (mw)

trabajo: 10  
 2 07/04/2021 18:27:53



I (mA)

## VL2 Diseño y Simulación de un circuito con un fotodetector PIN.-

### DATOS:

**Vcc:**  Voltios  
**Vo=**  mVoltios  
**Sea:**  Kohms  
**R:**  Kohms

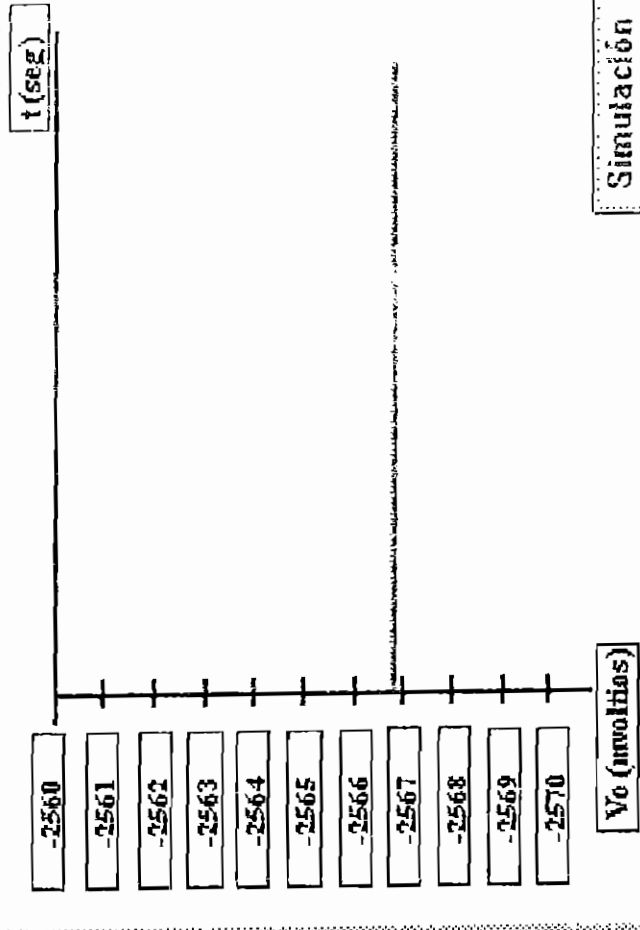
### Datos del elemento:

**VRmin:**  Voltios  
**Emax:**  mW/cm<sup>2</sup>  
**ImáxDc:**  uA  
**iods:**  uA

### RESULTADOS:

**Iin:**  mW/cm<sup>2</sup>  
**Idc=**  uA

### CIRCUITO:



### VI.3 Diseño y Simulación de un circuito con fototransistor trabajando como switch (AND).-

**DATOS:**

VCEsaturA:  Voltios

VCEsaturB:  Voltios

Vcc:  Voltios

Sea:  mA

**CIRCUITO:**

**Datos del las #lecuantos:**

VCEmáxA:  Voltios

IcmáxA:  mA

VCEmáxB:  Voltios

IcmáxB:  mA

**RESULTADOS:**

RL=  Kohms

RLsta  Kohms

Yo=  Voltios

Icstax=  mA

<b>IL</b>	<b>0L</b>	<b>IL</b>	<b>0L</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
11111111		10101110		10101011	

**Calcula**

**Calcula**

**Calcula**



### VI.4 Diseño y Simulación de un circuito con fototransistor trabajando como switch (NAND).-

**DATOS:**

VCesatur.A:  Voltios

VCesatur.B:  Voltios

Vcc:  Voltios

Sea:

**Datos de los elementos:**

VCEmáx.A:  Voltios  
mA

Icmáx.A:

VCEmáx.B:  Voltios  
mA

Icmáx.B:

**RESULTADOS:**

RL=  Kohms

RLsta  Kohms

Vo=  Voltios

Iccsim=  mA

**CIRCUITO:**

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
1L	0L	1L	0L	4.634	0	11111111	1010101110	0101010001																	
											<b> Voltaje de Salida</b>					<b> Corriente de Salida</b>					<b> Calcular</b>				

### VI.5 Diseño y Simulación de un circuito con fototransistor trabajando como switch (OR).-

**DATOS:**

VCEsatur.A:  Voltios

VCEsatur.B:  Voltios

Vcc:  Voltios

Sea:

Ictrabajo:

---

**Datos de los elementos:**

VCEmáxA:  Voltios

IcmáxA:  mA

VCEmáxB:  Voltios

IcmáxB:  mA

---

**RESULTADOS:**

RL=  Kohms

RLsta  Kohms

Vo=  Voltios

Icstan=  mA

Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada	Entrada
1L	0L	1L	0L	1L	0L	1L	0L	1L	0L	1L
					1111111111					
					1010101110					
					1111111111					

### VI.6 Diseño y Simulación de un circuito con fototransistor trabajando como switch (NOR).-

**DATOS:**

VCEsatur.A:  Voltios

VCEsatur.B:  Voltios

Vcc:  Voltios

Sea:

**Datos del Ibs elementos:**

VCEmáxA:  Voltios  
IcmáxA:  mA

VCEmáxB:  Voltios  
IcmáxB:  mA

**RESULTADOS:**

RL=  Kohms

RLsta  Kohms

V0=  Voltios

Icstan=  mA

**CIRCUITO:**

1L	0L	1L	0L	4	0
<input type="text" value="1111111111"/>	<input type="text" value="1010101110"/>	<input type="text" value="0000000000"/>	<input type="text" value="0000000000"/>	<input type="text" value="0000000000"/>	<input type="text" value="0000000000"/>

Voltaje de Salida

Corriente de Salida

Calcular

### VI.7 Diseño y Simulación de un Demodulador con un Circuito en emisor común.

#### DATOS:

A:      

Zin:      

RL:      

Bmin:      

frec.:

#### Datos del elemento:

VCReg:      

YBE:      

VT:      

BW:

#### RESULTADOS:

Vcc:      

Rc:      

RE1:      

RE2:      

RB1:      

RB2:      

Cc:      


CE:

#### CIRCUITO:

escala estándar      cambio de escalas      Resct 1

Vcc:       Vc:      

VE:



**V18 Diseño y Simulación de un Demodulador con un circuito en emisor común. Posibilidad de variación de resultados (sólo con Zin).**

**DATOS:**

A: 5 Kohms  
 Zin: 11 Kohms  
 freq.: 12 KHz  
 Vimp: 0.06 Voltios  
 RL: 2 Kohms  
 Bmín: 100

**Parámetros del esquema:**

VCReg: 2.5 Voltios  
 VBE: 0.6 Voltios  
 VT: 0.025 Voltios  
 BW: 1.2 KHz

**RESULTADOS:**

Rc:	0.7482 Kohms	Vcc:	17 Voltios
Rc:	0.9727 Kohms	VRe:	0.4945 Voltios
RE1:	31.311 Kohms	VCe:	3.66 Voltios
RE2:	25.267 Kohms	VRE1:	1.7506 Voltios
RB1:	49.589 Kohms	VR:	12.391 Voltios
RB2:	204.14 Kohms	VE:	12.791 Voltios
RB3:	265.38 Kohms	VEc:	13.641 Voltios
Cc:	0.2926 uF	CE:	1.01326

**Parámetros de salida:**

Kohms	Voltios
Rc: 0.8	Vcc: 15
RE1: 32	VRe: 0.4619
RE2: 27	VCE: 2.36
RB1: 57	VRB1: 2.722
RB2: 205	VB: 11.838
Cc: 0.25	VE: 11.238
CE: 1.2	Vc: 14.098

**escala estándar cambio de escalas** **Reset 1**

Vcc: 17  
 Vc: 15.6  
 Vimp: 0.06  
 Vop: 0.3  
 VE: 12.7

**Calcular** **Calcular** **Reset**

VEs: 1.2

**CIRCUITO:**

**VI.9 Diseño y Simulación de un circuito de disparo con fotoSCR (impulso positivo).**

**DATOS:**

Vcc:  Voltios

Vmín:  Voltios

Vmáx:  Voltios

t1:  ms

t2:  ms

Sea:  mA

i:  mA

Edispa:  mW/cm<sup>2</sup>

Simulación

Reset 1

Calcular

Reset

CORRIDO

**RESULTADOS:**

R1:  Kohms    R1s:  Kohms

R2:  Kohms    R2s:  Kohms

C:  uF    Cs:  uF

t1s:  ms    t2s:  ms

**Edisp:**     **Vc:**     **Vo:**

Vc:     Vmín:     Vmáx:

Vo:     t1:     t2:

### VL10 Diseño y Simulación de un circuito de disparo con fotoSCR (impulso negativo).-

**■ DATOS:**

Vcc:  Voltios

Vmin:  Voltios

Vmáx:  Voltios

t1:  ms

t2:  ms

Sea:

i:  mA

Edispa:  mW/cm<sup>2</sup>

**■ RESULTADOS:**

R1:  Kohms

R1s:  Kohms

R2:  Kohms

R2s:  Kohms

C:  uF

t1s:  ms

t2s:  ms

Edisp:

V<sub>cc</sub>: 12

V<sub>máx</sub>: 11

V<sub>c</sub>:

V<sub>máx</sub>: 11

V<sub>o</sub>:

V<sub>máx</sub>: 11

**VI.11 Diseño y Simulación de un circuito con fototriac (sincronización).**

**DAÑOS:**

Vp(Da):  Voltios

frec(fa):  Hz

E1:  mW/cm<sup>2</sup>

frec1:  Hz

IGTriac2:  mA

Sea:

i2:  mA

**Datos de los elementos:**

Vppmáx1:  Voltios

imáx1:  mA

Vppmáx2:  Voltios

imáx2:  mA

**RESULTADOS:**

R2:  Kohms

R2s:  Kohms

R1>:  Kohms

R1<:  Kohms

**CIRCUITO:**

Vppmáx1:

frec1:

E1:

frec1:



**VL12 Diseño y Simulación de un IRED alimentado con una señal senoidal.-**

**DATOS:**

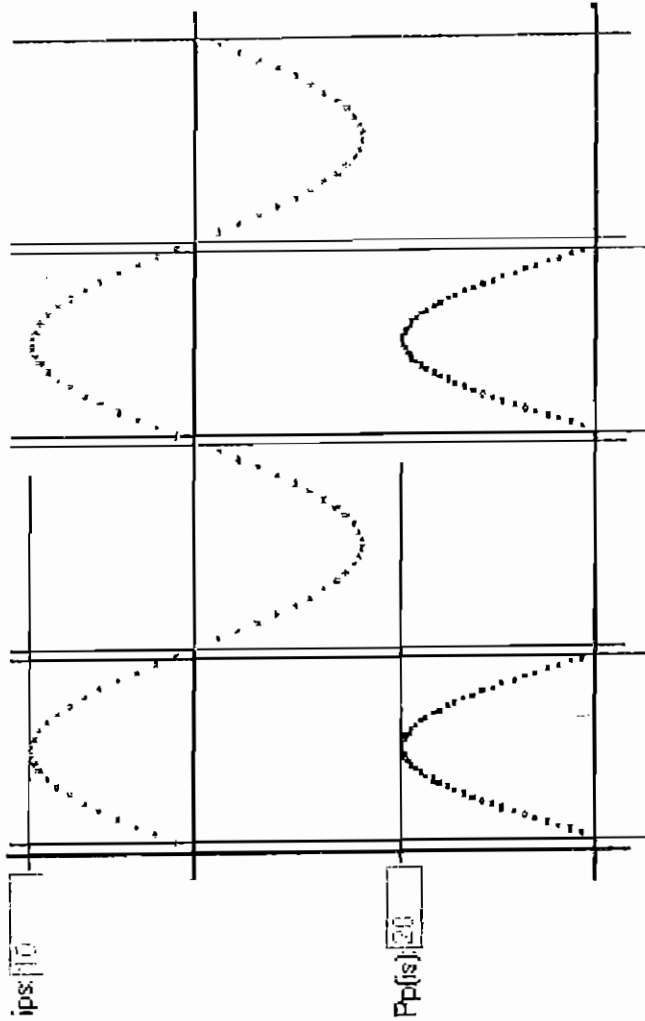
V<sub>pin</sub>:  Voltios  
 V<sub>F(IRED)</sub>:  Voltios  
 P<sub>pico</sub>:  mW

**Datos del elemento:**

i<sub>máx(IRED)</sub>:  mA  
 P<sub>(i<sub>máx</sub>)</sub>:  mW

**RESULTADOS:**

R:  Kohms  
 R<sub>s</sub>:  Kohms  
 i<sub>pico</sub>:  mA  
 i<sub>óico s</sub>:  mA  
 P<sub>pico s</sub>:  mW  
 alfa:  grados  
 beta:  grados



### VI.13 Diseño y Simulación de un modulador de luz con IRED.

**DATOS:**

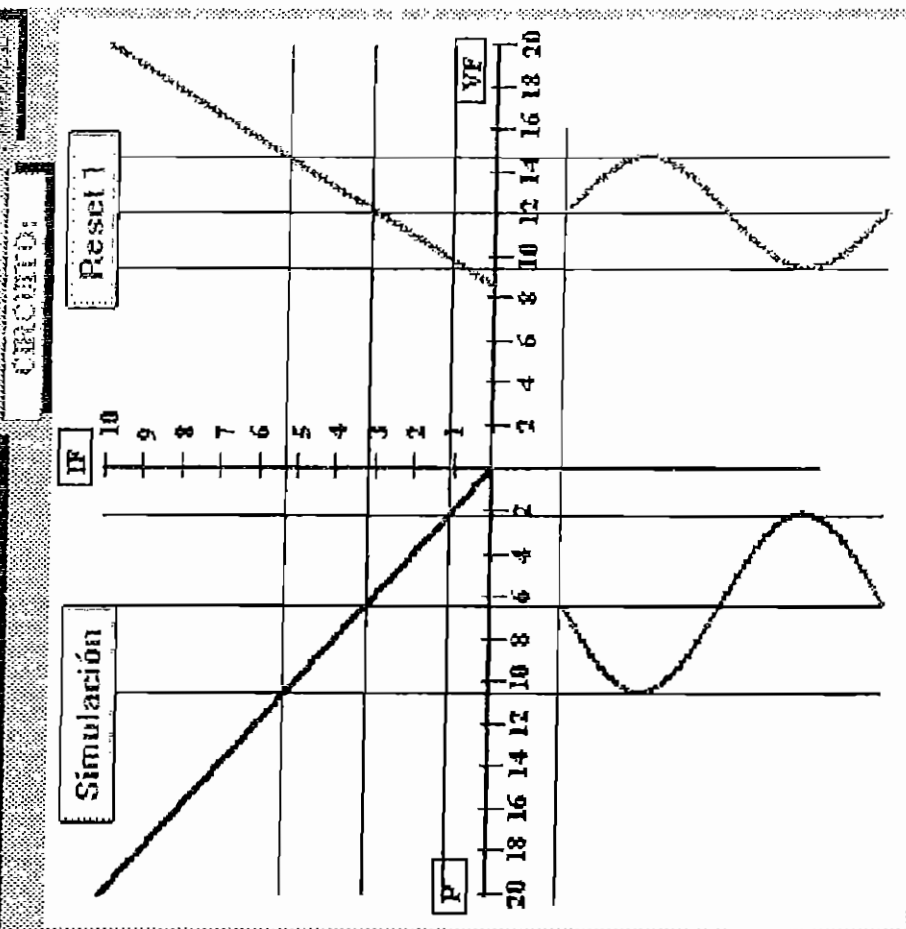
Vimp:  Voltios  
 fin:  KHz  
 Sea:  Voltios  
 IFtrab:  mA  
 vftrab:  Voltios

**Datos del elemento:**

VFmáx:  Voltios  
 imáxDC/IRID:  mA  
 P(imáx):  mW

**RESULTADOS:**

Vcc:  Voltios  
 Rac:  Kohms  
 iacpS:  P(iacpS)  
 Rdc:  Kohms  
 idcS:  P(idcS)  
 C:  Cs  
 rrv:  Kohms



### VI.14 Diseño y Simulación de un demodulador de luz con fotodiodo.-

**DATOS:**  **CIRCUITO:**

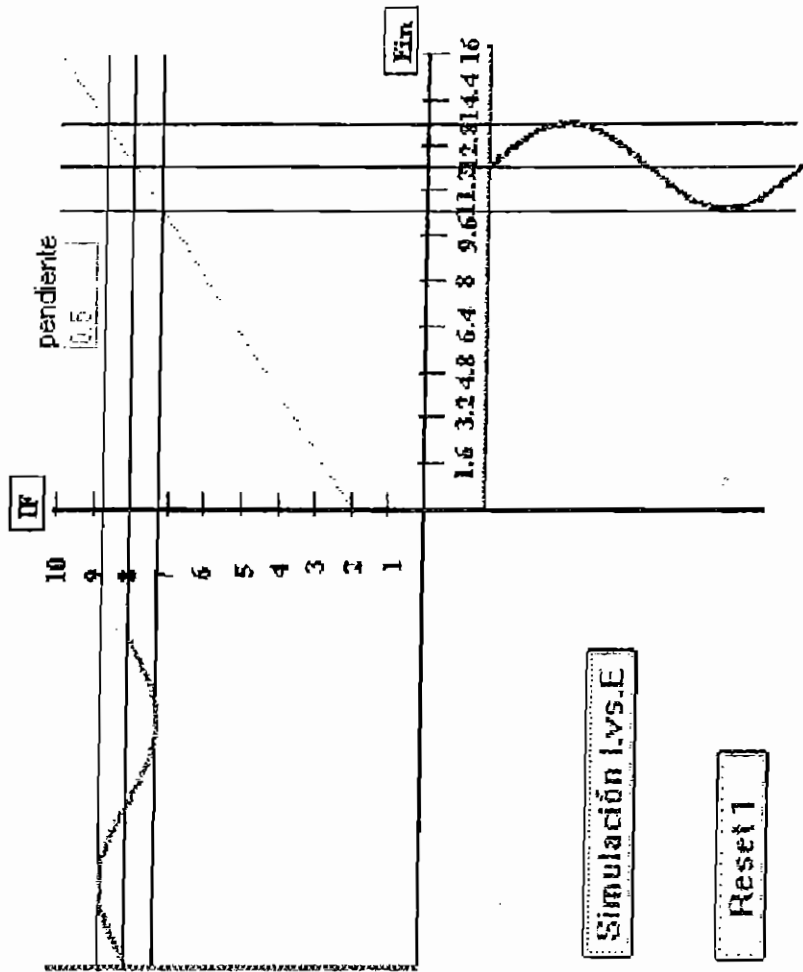
**Vec:**  Voltios  
**fín:**  MHz  
**Ci:**  pF  
**Eppín:**  mW/cm<sup>2</sup>  
**Sea:**    
**Idc:**  uA

**Datos del elemento:**

**VRmin:**  Voltios  
**Emáx:**  mW/cm<sup>2</sup>  
**Iv máx:**  uA  
**ibr:**  uA

**RESULTADOS:**

**R<:**  Kohms  
**Rs:**  Kohms  
**íarp:**  uA  
**Ede(ín):**  mW/cm<sup>2</sup>  
**vovac =**  mVoltios  
**Vodc =**  mVoltios



Simulación I.V.S.E

Reset 1

### VL15 Diseño y Simulación de un Modulador de luz de onda cuadrada-

**DATOS:**

**Vcc:**  Voltios  
**Vf:**  Voltios  
**Po:**  mW  
**Bmín:**   
**T1:**  ms  
**T2:**  ms

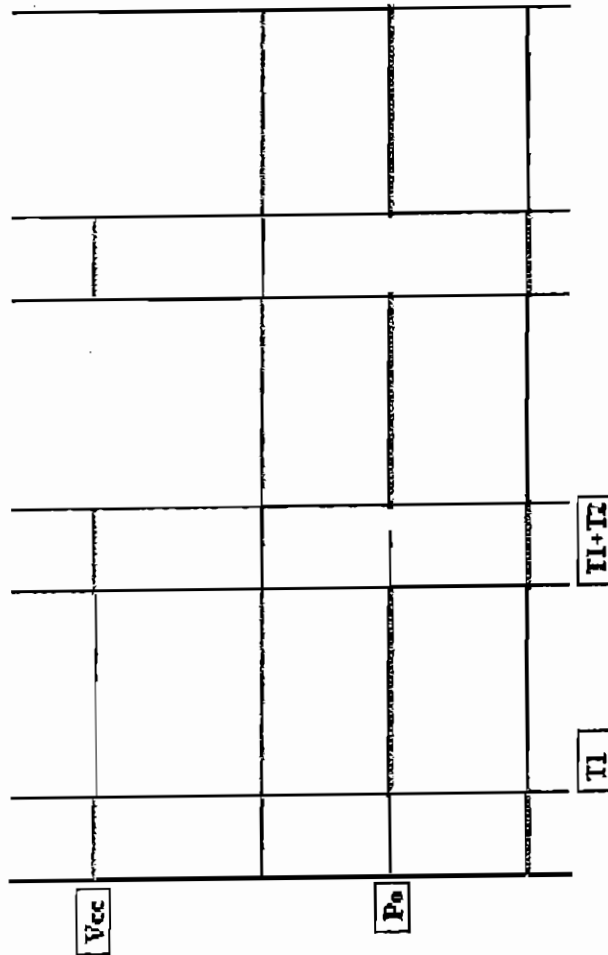
**Datos de los elementos:**

**VCEmáx:**  Voltios  
**Icmáx:**  mA  
**VCEsat:**  Voltios  
**P(máx):**  mW  
**I(máx):**  mA

**RESULTADOS:**

**Rv=**  Kohms  
**Kvstan**  Kohms  
**Ic:**  mA  
**Icstan=**  mA  
**RB=**  Kohms  
**RBstan**  Kohms

**CIRCUITO:**



**VL16 Diseño y Simulación de un acoplador de diferentes familias digitales.-**

**DATOS:**

Vcc1:  Voltios  
 tol1:  %  
 IF1typ:  mA  
 VF1máx:  Voltios  
 VF1typ:  Voltios  
 VF1mín:  Voltios  
 VoL1máx:  Voltios  
 VoL1typ:  Voltios  
 VoL1mín:  Voltios  
 CTR:  %

**DATOS:**

Vcc2:  Voltios  
 tol2:  %  
 tol de R:  %  
 VH2máx:  Voltios  
 VoL2máx:  Voltios  
 VH2mín:  Voltios  
 IH2máx:  mA  
 IH2mín:  mA  
 IoH2máx:  mA

**RESULTADOS:**

R1:  Kohms  
 R1stan.:  Kohms  
 IF1máx:  mA  
 IF1mín:  mA  
 IoL2máx:  mA  
 R2<:  Kohms  
 R2>:  Kohms

Calcular

Reset

Simulación

CIRCUITO:

Capacitor

## **ANEXO 2**

- **Datos de algunos elementos optoelectrónicos (tomados de manuales).**



## DISCRETE LED INDICATORS

NTE TYPE NO.	DESCRIPTION/APPLICATION	DIAG NO.	ØT1 MEAS GAG	IND PKG SIZE	TYPICAL VIEWING ANGLE (°)	VIF/CD COLOR	TYPICAL LUMINOUS INTENSITY	TYPICAL FORWARD VOLTAGE DROP	MAX REVERSE BREAKDOWN VOLTAGE	MAX DC FORWARD CURRENT	MAX PWR DISS
							mcd	V <sub>f</sub>	V <sub>R</sub>	I <sub>F</sub>	(mW)
3000	Indicator lights, Diagnostic & panel displays. Printed circuit board indicators, Miniature low profile package	133	4	T-1/4	60	Clear Red	1.4	1.65	5	40	80
3001		133	4	T-1/4	80	Diffused Red	1	1.65	5	40	80
3002		133	2	T-1/4	80	Clear Yellow	1	2.10	5	35	105
3003		133	2	T-1/4	80	Clear Green	1	2.20	5	35	105
3004	Diagnostic or Indicator lights in Low-Power/Low-Current Environments, MOS Compatible, Compatible with Integrated Circuits	134	2	T-1/4	25	Red	.5	1.80	5	35	105
3007	General Purpose Indicators, Developmental Projects, Breadboards	135	4	T-1	70	Red	1.8	1.60	5	50	100
3008		135	2	T-1	90	Bright Red	5	2.50	5	50	100
3009		135	2	T-1	90	Orange	5	2.00	5	35	105
3010		135	2	T-1	90	Green	1	2.20	5	35	105
3011		135	2	T-1	90	Yellow	4	2.10	5	35	105
3012	Panel Circuit Indicators, Low Drive Power, High Intensity Visible Light Emission	136	4	—	30	Diffused Red	1.5	2.20	4	35	100
3013		137	4	—	20	Clear Red Jewel	1.7	2.20	4	35	100
3014		136	2	—	35	Clear Green	3	2.15	4	45	125
3015		137	2	—	25	Clear Green Jewel	1.8	2.15	4	45	125
3016	Milk white diffused lens, Two-color panel circuit indicator, Fast response time, Capable of pulse operation	138	2	—	90	High Intensity	6	2.10	4	25	75
3018	Instruments, Printed circuit board indicators, Board-mounted panel display	139	2	T-1 1/4	90	Soft Red	1.8	1.65	5	100	180
3019		139	2	T-1 1/4	60	Soft Red	3	1.65	5	100	180
3020	Computers, General purpose indicators, Instruments, Test systems, Mini and Micro-processors, Process control industrial systems, Sorting machines, Assembly equipment, Vending machines, Telephone equipment, Backlight panels, High intensity indicators in four colors	140	2	T-1 1/4	80	Diffused Red	1.7	1.7	5	100	180
3021		140	2	T-1 1/4	65	Diffused Yellow	8	2.1	5	35	120
3022		140	2	T-1 1/4	65	High Eff Dif Red	9	2	5	35	120
3023		140	2	T-1 1/4	65	Diffused Orange	6	2	5	35	120
3024		140	2	T-1 1/4	65	Diffused Green	3.5	2.2	5	35	120
3025	Instruments, Printed circuit board indicators, Board-mounted panel display	141	2	T-1 1/4	40	Red	3	1.8	5	100	180
3026	Polarity indicator Tri-State indicator, Flow direction display, Instruments, Tester displays, educational aids	142	1	—	50	Red or Green	1.5-R .5-G	1.65-R 2.2-G	— —	70-R 35-G	200
3020	Blinking LED Pulse Rate 3Hz	363	1	T-1 1/4	40	Diffused Red (Blinking)	1.6	5.0	—	20	—
3160	Rectangular LED's Designed For Level Meter Displays, Bar Graph Displays, Instrumentation and General Purpose Applications.	166	5	—	50	Diffused Red	0.4	1.9	3.0	25	70
3161		166	5	—	50	Diffused Green	0.7	2.1	3.0	25	70
3162		166	5	—	50	Diffused Yellow	2.0	2.1	3.0	25	70
3163		167	5	—	50	Diffused Red	0.4	1.9	3.0	25	70
3164		167	5	—	50	Diffused Green	0.7	2.1	3.0	25	70
3165		167	5	—	50	Diffused Yellow	1.0	2.1	3.0	25	70
3166		168	5	—	50	Diffused Red	0.4	1.9	3.0	25	70
3167		168	5	—	50	Diffused Green	0.8	2.1	3.0	25	70
3168		168	5	—	50	Diffused Yellow	2.0	2.1	3.0	25	70

## PHOTOTRANSISTOR DETECTORS

NTE TYPE NO.	DESCRIPTION	DIAG NO.	MAX DARK CURRENT	MAX COLLECTOR CURRENT	MAX COLLECTOR DARK CURRENT AT 25°C	MIN LIGHT CURRENT	MAX POWER DISS AT 25°C	TYPICAL RESPONSE TIME (µS)	PACKAGE
			I <sub>D</sub> (µA)	I <sub>C</sub> (mA)	I <sub>C</sub> (µA)	I <sub>L</sub> (µA)	P <sub>T</sub> (mW)		
3031	NPN, Si, Visible and IR	148	80	40	20 @ V <sub>CE</sub> 5V	6	200	2	TO-18 Flat Lens
3032	NPN, Si, Visible and IR	149	80	40	20 @ V <sub>CE</sub> 5V	12	200	2	TO-18 Dome Lens
3034	NPN, Si, Visible and IR	150	60	100	100 @ V <sub>CE</sub> 10V	2 @ 5V	200	8	TO-92
3035	NPN, Si-Darlington I <sub>BE</sub> = 2.0K Visible and IR	150	40	250	100 @ V <sub>CE</sub> 12V	2 @ 5V	200	250	TO-92
3037	NPN, Si, Visible and IR	151	50	50	200 @ V <sub>CE</sub> 30V	10 @ 3V	150	2	5018 Dome Lens
3038	NPN, Si, Visible	174	25	20	500 @ V <sub>CE</sub> 10V	5 @ 3V	50	1.5	—

## INFRARED EMITTING DIODES

NTE TYPE NO.	Description	Diag No.	Total Emitted Radiated Power Typ	Maximum Forward Voltage (V)	Reverse Voltage (V)	DC Forward Current (mA)	Power Diss (mW)	Typical Peak Emission Wave Length (µm)	Typical Response Time (ns)
			P <sub>0</sub>	V <sub>F</sub>	V <sub>R</sub>	I <sub>F</sub>	P <sub>0</sub>	λ <sub>P</sub>	
3005	PN Gallium Arsenide	147	550 µW	1.5	3	50	75	900	10
3006	PN Gallium Arsenide	143	3 mW	1.8	3	50	75	940	500
3027	PN Gallium Arsenide	144	1 mW	1.5	5	100	150	950	400
3028	PN Gallium Arsenide	145	650 µW	1.5	3	150	250	900	50
3029	PN Gallium Arsenide	146	150 µW	1.5	3	100	215	930	50



## OPTOISOLATORS (PHOTOTHYRISTOR OUTPUTS)

NTE TYPE NO.	PHOTOTHYRISTORS OUTPUT CONFIGURATION	Diag No.	TOTAL DEVICE RATINGS				LED RATINGS				PHOTOTHYRISTOR RATINGS			
			ISOLATION VOLTAGE SURGE (V)	TOTAL POWER (mW)	MAX FORWARD CURRENT (mA)	MAX REVERSE VOLTAGE (V)	MAX BLOCKING VOLTAGE (V)	MAX CYCLE TRIGGER VOLTAGE (V)	MAX TURN ON CURRENT (Threshold) (mA)	MAX ON VOLTAGE AT I <sub>T</sub> (V)	MAX HOLDING CURRENT (mA)	MAX GATE TRIGGER CURRENT (µA)		
			V <sub>ISO</sub>	P <sub>T</sub>	I <sub>F</sub>	V <sub>R</sub>	V <sub>ORM</sub>	V <sub>GT</sub>	I <sub>FT</sub>	V <sub>OH</sub>	I <sub>HOLD</sub>	I <sub>GT</sub>		
3046	SCR	152b	3550	290	60	3	400	1	14	1.3 @ 100 mA	.5	100		
3047	Triac	152e	7500	330	50	3	250	—	15	3 @ 100 mA	100 µA typ	—		
3048	Triac	152e	7500	330	50	3	400	—	15	3 @ 100 mA	100 µA typ	—		
3049	Zero Crossing Triac Driver	152d	7500	330	50	3	250	—	15	3 @ 100 mA	100 µA typ	—		

## OPTOISOLATORS PHOTOTRANSISTOR OUTPUTS

NTE TYPE NO.	OUTPUT CONFIGURATION	Diag No.	TOTAL DEVICE RATINGS			LED MAX RATINGS		PHOTOTRANSISTOR RATINGS		
			ISOLATION VOLTAGE SURGE (V)	TOTAL POWER (mW)	DC CURRENT TRANSFER RATIO %*	MAX FORWARD CURRENT (mA)	MAX REVERSE VOLTAGE (V)	COLLECTOR TO BASE VOLTAGE (V)	COLLECTOR TO EMITTER VOLTAGE (V)	MAX COLLECTOR DARK CURRENT (nA)
			V <sub>ISO</sub>	P <sub>T</sub>	C <sub>TR</sub>	I <sub>F</sub>	V <sub>R</sub>	BV <sub>CEO</sub>	BV <sub>CE0</sub>	I <sub>C</sub>
3040	NPN Transistor	152a	7500	250	20	80	3	70	30	100
3041	NPN Transistor	152a	7500	300	100	60	6	70	30	50
3042	NPN Transistor	152a	7500	250	20	60	3	70	30	50
3043	NPN Transistor	152a	3550	250	70	60	3	70	80	50
3044	NPN Darlington	152c	7500	250	300	80	3	—	80	1000
3045	NPN Darlington	152c	7500	250	500	80	3	—	80	1000
3081	NPN Transistor	179a	6000	250	20	60	4	—	30	100*
3082	NPN Darlington	179b	6000	250	400	60	4	—	30	100
3083	NPN Darlington	152f	7500	250	200	60	3	—	30	100
3084	NPN Darlington	152f	7500	250	100	60	3	—	55	100
3088	NPN Dual Transistor	401a	7500	400	50	60	3	—	30	100

\*The DC Current Transfer Ratio (C<sub>TR</sub>) is the output transistor collector current divided by the LED forward current (I<sub>F</sub>).

## PHOTON COUPLED INTERRUPTER MODULE

NTE NO.	Diag. No.	OUTPUT TRANSISTOR CONFIGURATION	EMITTER SPECIFICATIONS			DETECTOR SPECIFICATIONS			MAXIMUM TOTAL POWER DISSIPATION mW	TYPICAL SWITCHING SPEEDS	
			MAXIMUM REVERSE BREAKDOWN Volts	MAXIMUM FORWARD CURRENT mA	FORWARD VOLTAGE DROP Volts	MAXIMUM COLLECTOR-EMITTER VOLTAGE Volts	MAXIMUM COLLECTOR CURRENT mA	MAXIMUM COLLECTOR DARK CURRENT nA		TURN-ON t <sub>ON</sub>	TURN-OFF t <sub>OFF</sub>
			V <sub>BR(R)</sub>	I <sub>F</sub>	V <sub>F @ I<sub>F</sub></sub>	V <sub>CE0</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>CE0</sub>		µs	µs
3100	399	NPN Transistor	6	60	1.7	55	100	100	250	8	50
3101	399	NPN Darlington	6	60	1.7	55	100	100	250	7	45
3102	400	NPN Transistor	6	60	1.7	55	100	100	250	8	50
3103	400	NPN Darlington	6	60	1.7	55	100	100	25	7	45



**1N5722 THRU 1N5725  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS**

**TYPICAL CHARACTERISTICS**

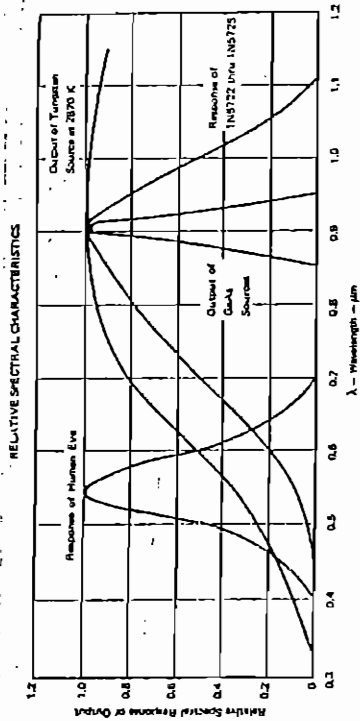


FIGURE 11

**TEXAS INSTRUMENTS CUSTOMIZED OPTOELECTRONIC ARRAYS**

The 1N5722 through 1N5725 series is available mounted in circuit board for custom-designed array or matrix applications. The array is a complete unit, without the problems associated with small, difficult-to-handle components. These arrays can be designed for punched-card or tape readers, position indicators, pattern and character recognition, shift encoders, and many other special applications.

Texas Instruments custom-array techniques offer many advantages:

- The arrays are pre-assembled and tested, ready for installation.
- Custom arrays can be manufactured in almost any configuration to allow maximum design flexibility.
- Sensitivity across an entire array will be matched to within 50%.
- GaAs sources can be furnished to give complete solid-state matched sets for specific applications.
- Arrays with components firmly soldered into place on both sides of a printed circuit board are more rugged than individually wired emitting devices.

Specifying optoelectronic arrays is easy; all that is required is a print of the array and its desired specifications.

TI sales engineers will assist in developing specifications for special applications.

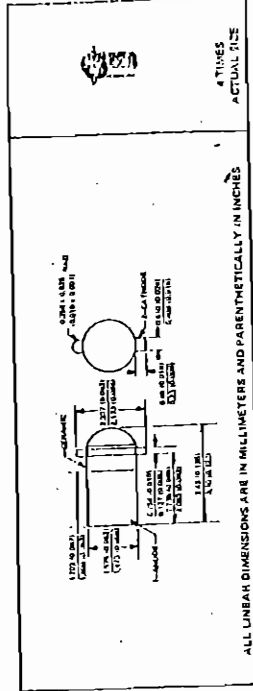
**TIL23, TIL24, TIL25  
P-N GALLIUM ARSENIDE INFRARED-EMITTING DIODES**

52132 FEBRUARY 1970—REVISED APRIL 1987

**DESIGNED TO EMIT NEAR-INFRARED RADIATION WHEN FORWARD BIASED**

- Output Spectrally Compatible with Silicon Sensors
- High Power Efficiency
- High Power Output
- Small Size Permits Matrix Assembly Directly into Printed Circuit Boards
- High Radiant Intensity
- TIL24HRZ\* Includes High-Reliability Processing and Lot Acceptance (Refer to TIL24HRZ for Summary of Processing)

mechanical data



absolute maximum ratings

Reverse Voltage at 25°C Case Temperature	2 V
Continuous Forward Current at 25°C Case Temperature (See Note 1)	100 mA
Operating Case Temperature Range	-65°C to 125°C
Storage Temperature Range	-85°C to 155°C
Soldering Temperature (10 seconds)	250°C

\* All electrical and mechanical specifications for the TIL24 also apply for TIL24HRZ.  
NOTE 1: Device linearly to 125°C case temperature at this rate of 1 mA/°C. For pulsed operation, see Figures 8 and 9.

PRODUCTION BALL ASSEMBLY OUTLINE INFORMATION  
This drawing is for information only. It is not intended for use in the design of a product. It is not intended to be used as a manufacturing drawing. It is not intended to be used as a reference for design or manufacturing.

TIL23, TIL24, TIL25  
P-N GALLIUM ARSENIDE INFRARED-EMITTING DIODES

TYPICAL CHARACTERISTICS

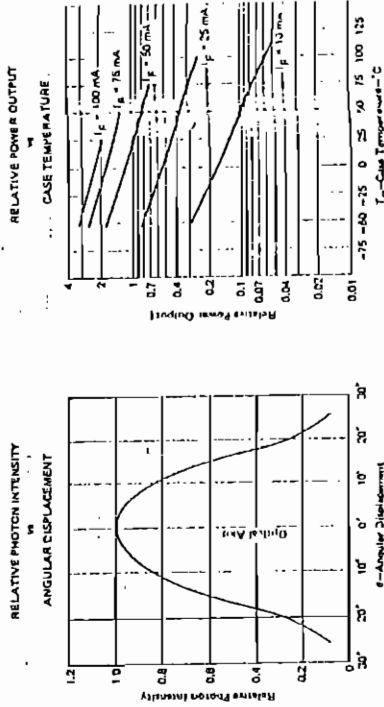


FIGURE 1

operating characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER	TEST CONDITIONS			TIL23			TIL24			TIL25		
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX
$I_F$ Radiant Power Output	0.4			0.40			0.75			0.40		
$\lambda_D$ Wavelength at Peak Emission	50			50			50			50		
$\Delta\lambda$ Spectral Bandwidth	25'			25'			35'			35'		
$E_{eff}$ Half-Intensity Beam Angle	1.25	1.5		1.5			1.5			1.5		
$V_F$ Basic Forward Voltage												1.5

$I_F = 30 \text{ mA}$

TYPICAL CHARACTERISTICS

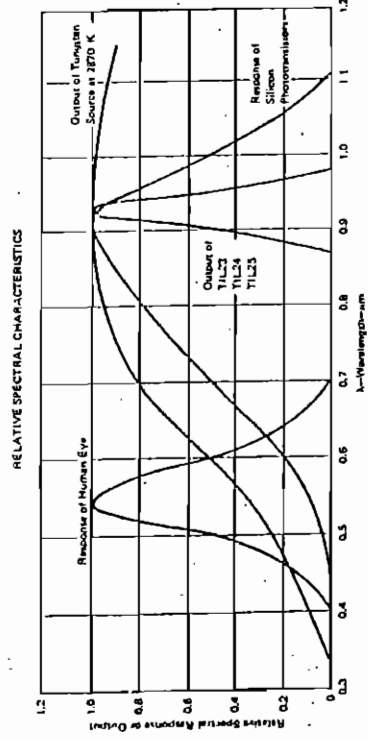


FIGURE 2

Infrared Emitters and Phototransistors



TIL23, TIL24, TIL25  
P-N GALLIUM ARSENIDE INFRARED-EMITTING DIODES

TYPICAL CHARACTERISTICS

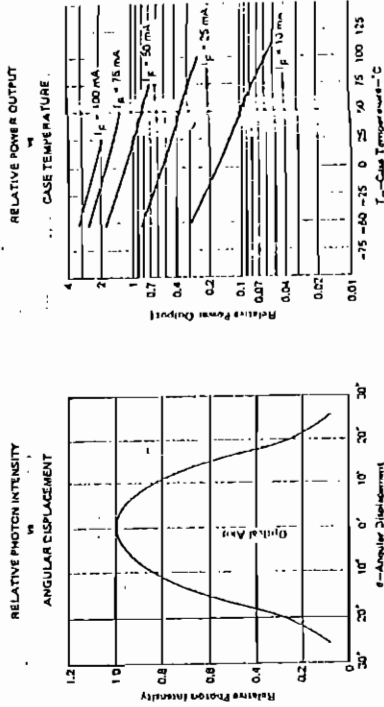


FIGURE 3

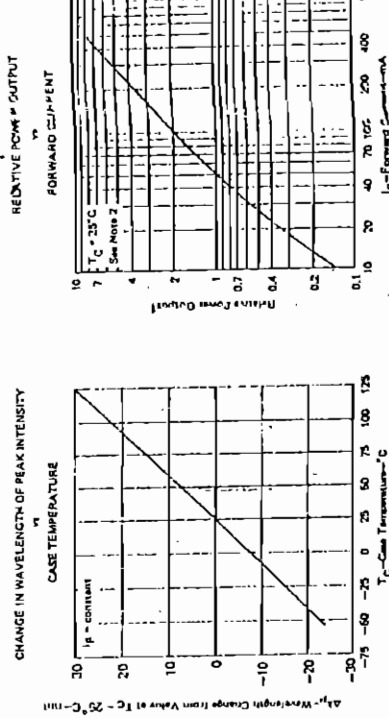


FIGURE 4

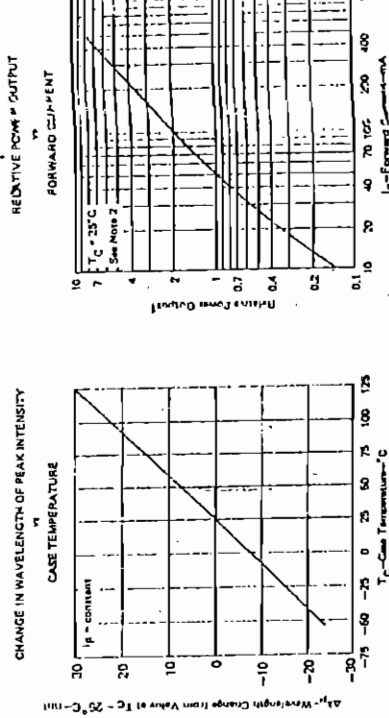


FIGURE 5

NOTE 2: These parameters were determined using pulsed modulation,  $I_F = 0.04 \text{ mA}$ , duty cycle  $< 10\%$ .  
\* Normalized to output at  $I_F = 50 \text{ mA}$ ,  $T_C = 25^\circ\text{C}$ .

TIL23, TIL24, TIL25  
P-N GALLIUM ARSENIDE INFRARED-EMITTING DIODES

TYPICAL CHARACTERISTICS

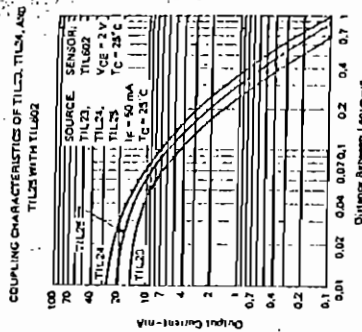
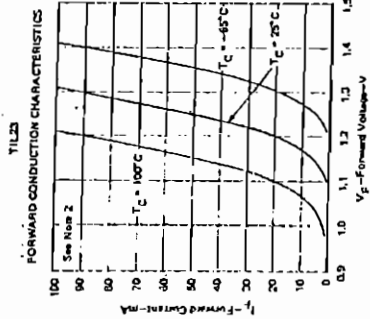


FIGURE 6

FIGURE 7

NOTE 2: These parameters must be measured using pulse technique, I<sub>F</sub> = 0.04 mA, duty cycle < 10%.

THERMAL CHARACTERISTICS

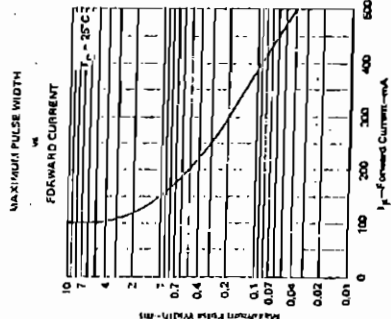


FIGURE 8

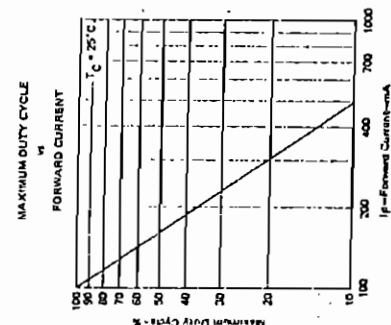


FIGURE 9

Infrared Emitters and Phototransistors

TIL24HRZ  
HIGH-RELIABILITY PROCESSING AND LOT ACCEPTANCE

- This processing applies only to devices ordered under the part number TIL24HRZ
- For electrical and mechanical specifications, refer to TIL24 data sheet

This processing and lot acceptance follow the sequence of tests in MIL-S-19500 for JANXX types. This is not to be construed to be a JANXX-qualified part. A detail specification is available upon request through your TI Field Sales Office, local authorized TI distributor, or by writing directly to:

Texas Instruments Incorporated  
LITERATURE RESPONSE CENTER  
P.O. Box 809086  
Dallas, Texas 75380-8086

TEST	MIL-STD-750 TEST METHOD
100% Processing	
Storage: T <sub>A</sub> = 125°C, t = 24 h	1032
Temperature Cycle: -55°C to 125°C, 10 cycles	1031
Constant Acceleration, 20,000 G, Y <sub>1</sub> axis	2005
Power Burn-in: I <sub>F</sub> = 50 mA, t = 168 h	1009
Hermatic Seal, Fine	1071 Cond. C or M
Hermatic Seal, Gross	1071 Cond. C or D
External Visual	2071
Product Acceptance	2071
Group A: LTPD = 5	per 2h-41 1046
External Visual	
Electrical: T <sub>A</sub> = 25°C	
Group B-1: LTPD = 15	
Solderability	2028
Group B-2: LTPD = 10	
Thermal Shock	1031 Cond. B-1
Hermatic Seal, Fine	1071 Cond. G or H
Hermatic Seal, Gross	1071 Cond. C or D
Group B-3: LTPD = 5	
Steady-State Operating Life: t = 340 h	1027
Group B-4:	
Diecap, Internal Visual Design Verification	
1 Device/O Failure	2075
Bond Strength LTPD = 20 (IC = 0)	2007 Cond. A
Group B-5: Not Applicable	
Group B-6: LTPD = 7	
High-Temperature Life (Nondegrading)	1032
t = 340 h	

**TIL24HR2**  
**HIGH-RELIABILITY PROCESSING AND LOT ACCEPTANCE**

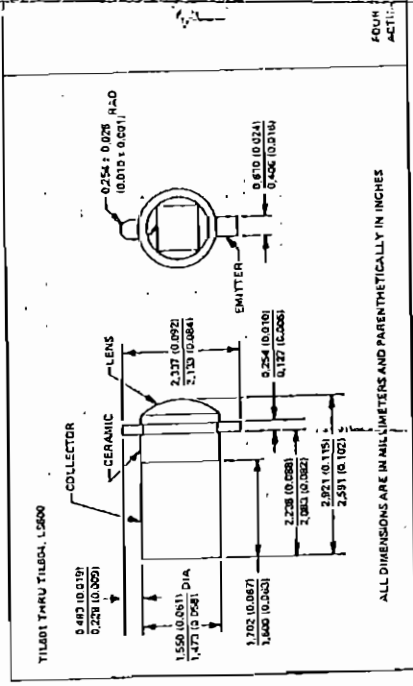
TEST	TEST METHOD
(Group C Tests are run on one lot every 14 months)	
Group C-1: LTPD = 15	2066
Physical Dimensions	
Group C-2: LTPD = 10	1086 Cond. A
Thermal Shock (Glass Strain)	1071 Cond. G or H
Hermetic Seal, Fine	1071 Cond. C or D
Hermetic Seal, Gross	1021
Moisture Resistance	2071
External Visual	
Group C-3: LTPD = 10	2016
Shocks: 1500 G	2058
Vibration: 50 G	2008
Acceleration: 2000 G (X, Y, Z Axis)	
Group C-4: LTPD = 15	1041
Salt, Atmosphere	
Group C-5: Not Applicable	
Group C-6: A = 10	1025
Storage-State Operating Life: t = 1000 h	

**TIL601 THRU TIL604**  
**N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS**

DESIGNED FOR HIGH-DENSITY READ OUT

- Hermetically Sealed Pill Package
- Recommended for Application in Character Recognition, Tape and Card Readers, Velocity Incri and Encoders
- Unique Package Design Allows for Assembly into Printed Circuit Boards
- Spectrally and Mechanically Compatible with TIL23 thru TIL25
- Saturation Level Directly Compatible with most TTL
- TIL604HR2\* Includes High-Reliability Processing and Lot Acceptance (See TIL-604HR2 for S-Processing)

mechanical data



\*All electrical and mechanical specifications for the TIL604 are given for TIL604HR2.

PRODUCTIVE DATA Development Services Information  
 For more information on Texas Instruments products and services, contact your nearest Texas Instruments sales office or write to Texas Instruments, P.O. Box 5012, Dallas, Texas 75220. Hermeticity is guaranteed under test conditions. Productivity is not guaranteed.

Copyright © 1982, Texas Instruments  
 INSTRUMENTS  
 POST OFFICE BOX 5012 • DALLAS, TEXAS 75220

**Infrared Emitters and Phototransistors**



TIL601 THRU TIL604, LS600  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

Collector-Emitter Voltage	50 V
Emitter-Collector Voltage	7 V
Continuous Device Dissipation at (or below) 25°C Case Temperature (See Note 1)	50 mW
Operating Case Temperature Range	-85°C to 125°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Soldering Temperature (10 seconds)	240°C

electrical characteristics at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TYPE	MIN	TYP	MAX	UNIT
V <sub>BR</sub> (CE) Collector-Emitter Breakdown Voltage	I <sub>C</sub> = 100 μA, E <sub>B</sub> = 0	ALL	50			V
V <sub>BR</sub> (EC) Emitter-Collector Breakdown Voltage	I <sub>C</sub> = 100 μA, E <sub>B</sub> = 0	ALL	7			V
I <sub>D</sub> Dark Current	V <sub>CE</sub> = 30 V, E <sub>B</sub> = 0, I <sub>C</sub> = 0.4 mA, T <sub>C</sub> = 100°C	ALL		3		μA
I <sub>L</sub> Light Current	V <sub>CE</sub> = 5 V, E <sub>B</sub> = 0, I <sub>C</sub> = 0.4 mA, T <sub>C</sub> = 25°C, See Note 2	TIL601		0.5		μA
		TIL602		2		μA
		TIL603		4		μA
		TIL604		7		μA
V <sub>CE</sub> (sat) Collector-Emitter Saturation Voltage	I <sub>C</sub> = 0.4 mA, E <sub>B</sub> = 0, I <sub>B</sub> = 20 mA/cm <sup>2</sup> , See Note 2	ALL		0.15		V

NOTES: 1. Device heavily to 125°C at the rate of 0.5 mW/cm<sup>2</sup>.  
2. Irradiance (I<sub>B</sub>) is the incident optical power per unit area incident upon a surface. For this measurement the source is an unfiltered tungsten lamp filament operating at a cool temperature of 2870 K.

switching characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TYP	UNIT
t <sub>r</sub> Rise Time	V <sub>CE</sub> = 30 V, I <sub>C</sub> = 200 μA, R <sub>L</sub> = 1 kΩ, See Figure 1	B	ns
t <sub>f</sub> Fall Time		B	ns

TIL601 THRU TIL604, LS600  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

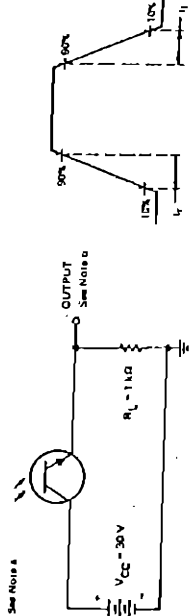


FIGURE 1  
OUTPUT VOLTAGE WAVEFORM

NOTES: A. Input irradiance is supplied by a pulsed germanium pinpoint infrared emitter with rise and fall times of less than 50 nS. Infrared radiation is adjusted for I<sub>B</sub> = 800 μA.  
B. Output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics: h<sub>FE</sub> > 25, R<sub>in</sub> > 1 kΩ, C<sub>in</sub> < 20 pF.

TYPICAL APPLICATION DATA

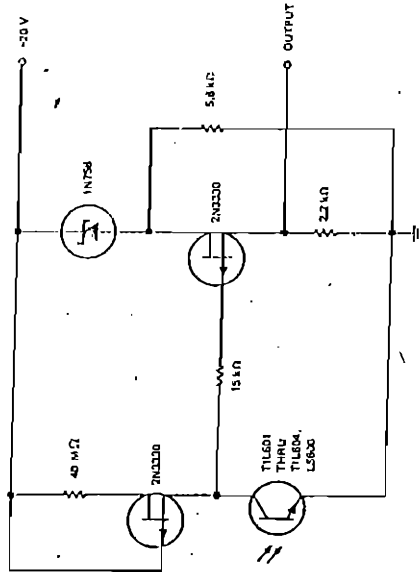


FIGURE 2—LOW-LEVEL DETECTOR AND PREAMPLIFIER

TIL601 THRU TIL604, LS600  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

TYPICAL APPLICATION DATA

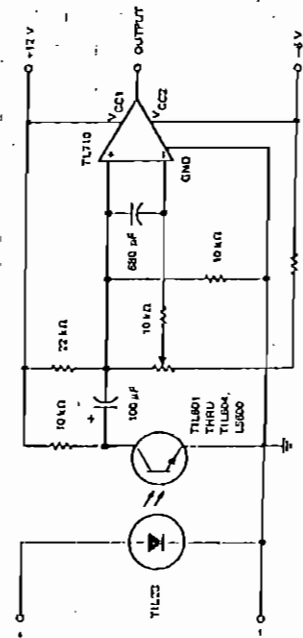


FIGURE 3—OPTICALLY COUPLED AMPLIFIER

Infrared Emitters and Phototransistors

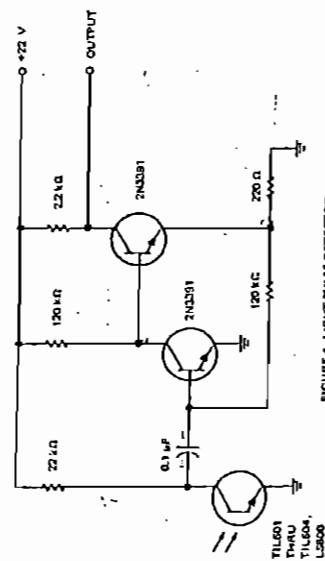


FIGURE 4—LIGHT PULSE DETECTOR

TIL601 THRU TIL604, LS600  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

TYPICAL CHARACTERISTICS

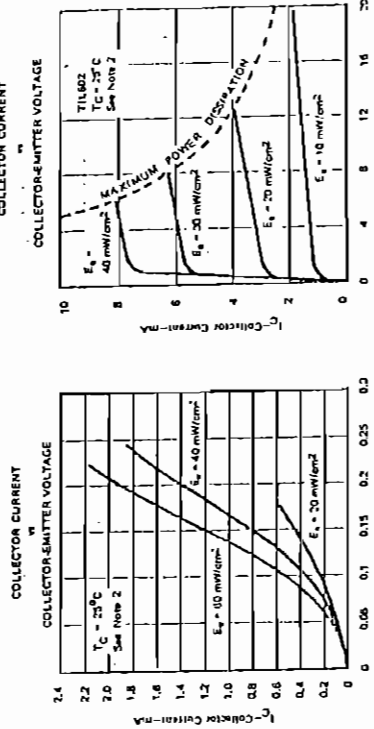


FIGURE 4

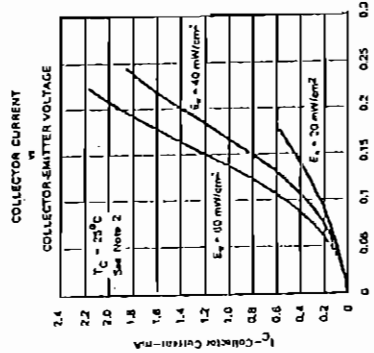


FIGURE 5

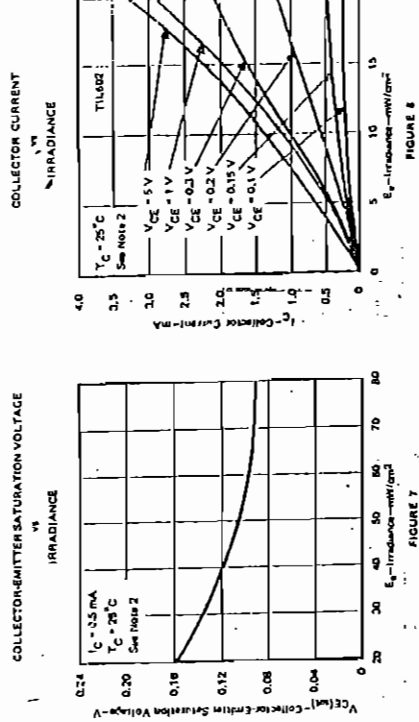


FIGURE 6

FIGURE 7

NOTE 2: Irradiance (E<sub>i</sub>) is the radiant power per unit area which strikes a surface. For this measurement the surface is an unfiltered tungsten-halogen lamp operating at a color temperature of 2870°K.

TIL601 THRU TIL604, LS601  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

TYPICAL CHARACTERISTICS

NORMALIZED LIGHT CURRENT  
vs  
ANGULAR DISPLACEMENT

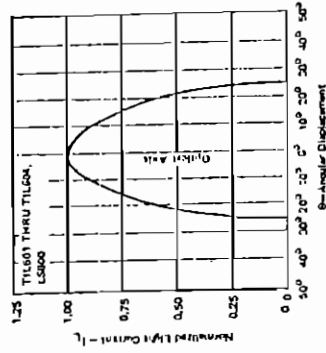


FIGURE 13

RELATIVE SPECTRAL CHARACTERISTICS

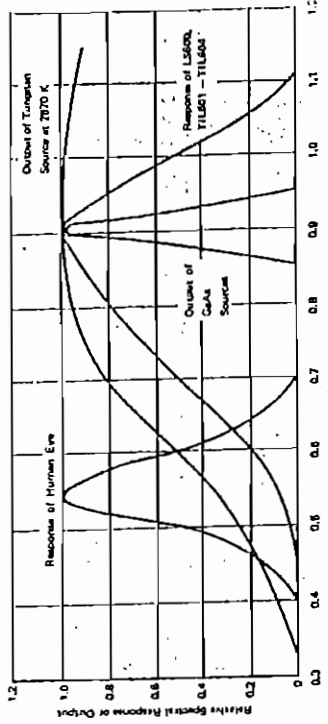


FIGURE 14

TIL601 THRU TIL604, LS600  
N-P-N PLANAR SILICON PHOTOTRANSISTORS

TYPICAL CHARACTERISTICS

DARK CURRENT  
vs  
CASE TEMPERATURE

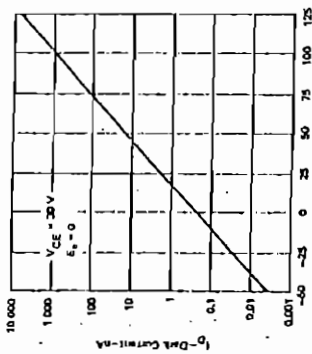


FIGURE 9

RELATIVE OUTPUT  
vs  
MODULATION FREQUENCY

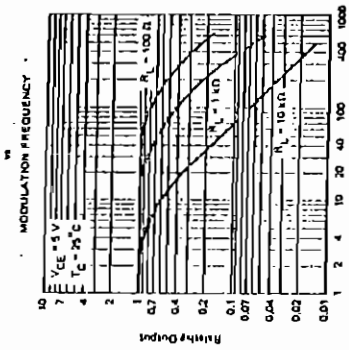


FIGURE 10

RELATIVE OUTPUT  
vs  
CASE TEMPERATURE OF SOURCE AND SENSOR

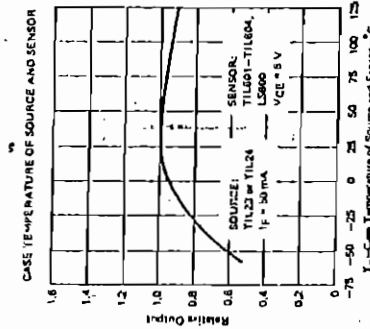


FIGURE 12

COUPLING CHARACTERISTICS  
OF TIL23 OR TIL24 WITH TIL602

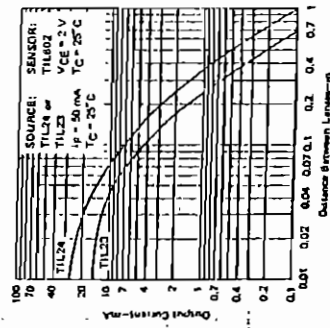


FIGURE 11

