

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“KIT DE ENTRENAMIENTO SOBRE LA  
TRANSMISIÓN DE SEÑALES A TRAVÉS DE FIBRA  
ÓPTICA”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**Presentado por:**

**José Gregorio Borbor Camacho**

**Jorge Rafael Molineros González**

**Gabriel Felipe Proaño Peña**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2007**

## **AGRADECIMIENTO**

**ING. GERMAN VARGAS,**

**Director de tesis,  
por su colaboración con  
la realización de este  
proyecto.**

# **DEDICATORIA**

**A nuestros padres y,  
sobre todo a Dios.**

## **TRIBUNAL DE GRADUACION**

---

Ing. Holger Cevallos  
PRESIDENTE

---

Ing. Germán Vargas  
DIRECTOR

---

Ing. Rebeca Estrada  
VOCAL PRINCIPAL

---

Dr. Freddy Villao  
VOCAL PRINCIPAL

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

---

José Borbor Camacho

---

Jorge Molineros González

---

Gabriel Proaño Peña

## RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño de un Kit de Entrenamiento sobre la Transmisión de señales a través de Fibra Óptica, teniendo como principal objetivo la elaboración de un folleto de prácticas experimentales, las mismas que utilicen infraestructura ya existente en los laboratorios de la Universidad. Este Kit de Entrenamiento tendrá como pilar fundamental de su implementación una nueva tecnología, la fibra óptica plástica, ya que por sus ventajas de reducción de costos y facilidad de manejo es la opción escogida como medio físico de transmisión.

La tesis empieza con un breve repaso de la física de la luz y sus propiedades como onda electromagnética y como energía. También se estudia la óptica geométrica como recurso para describir los mecanismos de propagación de la luz a lo largo de un medio guiado como la fibra óptica.

En el capítulo 2 se presentan los elementos que satisfacen un enlace por fibra óptica. Se estudia las diferentes fuentes ópticas que se pueden emplear en un transmisor, y se estudia los mecanismos de emisión de luz que estas poseen. Se revisan los diferentes detectores compatibles con los receptores ópticos para sistemas de telecomunicaciones y se presentan los principales elementos que limitan la sensibilidad de dichos receptores, así como los

criterios de su diseño. También se revisa a la fibra óptica como medio de transmisión, sus diferentes clases y parámetros de transmisión. Por último, se analiza a la fibra óptica de plástico como una tendencia diferente en el desarrollo de los sistemas de comunicaciones, sus múltiples ventajas y diversas aplicaciones.

En el tercer capítulo se redacta los pasos a seguir en la implementación de los módulos de transmisión y recepción óptica, utilizando a la fibra plástica como medio de transmisión, se describen: criterios de diseño, diagramas de bloques, esquemas y elementos utilizados, y la descripción funcional de los módulos. También se hace referencia a otros elementos que son parte de un sistema de transmisión óptico como son los dispositivos de interconexión: acoples y empalmes, y otras herramientas usadas, como medidores de potencia, ponchadoras, reflectómetros ópticos, entre otros.

Finalmente, se expone a manera de una guía documentada o manual de laboratorio, las prácticas experimentales, referentes al funcionamiento, características y propiedades que envuelven a un sistema de comunicaciones sobre fibra óptica tales como: atenuaciones en la fibra, ancho de banda, velocidad de respuesta, pérdidas en acoples y empalmes, comparación de diferentes diseños de transmisores/receptores, prácticas demostrativas sobre transmisión de voz, transmisión digital, etc.

## INDICE GENERAL

	<b>Páginas</b>
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XIV
INDICE DE TABLAS.....	XVI
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1	
1. PRINCIPIOS FISICOS DE LA LUZ EN UN MEDIO GUIADO.....	4
1.1. Parámetros ópticos de la luz en medios guiados.....	5
1.1.1. La luz como parte del espectro electromagnético.....	6
1.2 Parámetros geométricos de la luz en medios guiados.....	9
1.2.1. Índice de refracción.....	10
1.2.2. Leyes de Snell.....	12
1.2.3. Angulo Crítico.....	14
1.2.4. Reflexión total interna.....	15
1.2.5. Apertura Numérica.....	18

## CAPITULO 2

## 2. DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES

OPTICO.....	20
2.1 Fotoemisores.....	21
2.1.1. Diodos LED.....	23
2.1.2. Diodos Láser.....	33
2.2 Fotodetectores.....	41
2.2.1. Fotodiodo PIN.....	46
2.2.2. Fotodiodo de avalancha.....	48
2.2.3. Fototransistor.....	51
2.2.4. Fotodarlington.....	52
2.3. Fibra óptica.....	54
2.3.1. Propagación de la luz en el conductor y constitución de la fibra óptica.....	54
2.3.1.1. Tipos o modos de la fibra.....	60
2.3.1.2. Materiales de la fibra.....	66
2.3.2. Parámetro de medición/transmisión en la fibra óptica.....	68
2.3.2.1. Atenuación.....	69
2.3.2.2. Ancho de banda.....	73
2.3.2.3. Dispersión.....	78
2.3.2.4. Pérdidas por dobleces.....	83

2.3.2.5. Cableado.....	86
2.3.3. Fibra óptica plástica como nueva tendencia tecnológica.....	88
2.3.3.1. Reseña histórica.....	89
2.3.3.2 Generalidades de su fabricación.....	91
2.3.3.3. Avances recientes.....	99
2.3.3.4. Comparación de la fibra óptica de plástico con otros medios de transmisión.....	103
2.3.3.5. Aplicaciones.....	107

### CAPITULO 3

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICO COMPLETO CON FIBRA PLASTICA COMO MEDIO DE TRANSMISION.....	118
3.1. Criterio de diseño de un transmisor óptico.....	120
3.2. Criterio de diseño de un receptor óptico.....	125
3.3. Implementación del módulo de transmisión óptica.....	130
3.3.1. Generalidades y diagrama de bloques.....	132
3.3.2. Esquema, consideraciones del diseño y dispositivos utilizados.....	136
3.3.3. Descripción funcional.....	148
3.4. Implementación del módulo de recepción óptica.....	156

3.4.1. Generalidades y diagrama de bloques.....	157	
3.4.2. Esquema, consideraciones del diseño y dispositivos utilizados.....	160	
3.4.3. Descripción funcional.....	168	
3.5. Elementos de interconexión y herramientas ópticas.....	174	
3.5.1. Conectores.....	175	
3.5.2. Empalmes.....	184	
3.5.3. Herramientas especiales y equipos de medición.....	188	
CAPITULO 4		
4. GUIA DOCUMENTADA PARA LAS PRACTICAS DEL LABORATORIO DE FIBRA OPTICA.....		194
4.1. Generalidades y objetivo de las prácticas.....	196	
4.2. Descripción de las prácticas de Entrenamiento para la Transmisión de señales a través de Fibra Óptica.....	198	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	200	
APENDICES.....	203	
BIBLIOGRAFIA.....	276	

## ABREVIATURAS

<b>AC</b>	<i>Corriente Alterna</i>
<b>ALOFT</b>	<i>Airborne Light Optical Fiber Technology</i> Tecnología aérea de luz con fibra óptica
<b>AN</b>	<i>Apertura Numérica</i>
<b>APD</b>	<i>Avalanche Photodiode</i> Fotodiodo de avalancha
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> Tasa de error de bit
<b>BW</b>	<i>Bandwidth</i> Ancho de banda
<b>CMOS</b>	<i>Complementary Metal-Oxide</i> Metal-óxido complementario
<b>dB</b>	<i>Decibel</i>
<b>DC</b>	<i>Corriente Directa</i>
<b>DFB</b>	<i>Distributed Feedback</i> Retroalimentación distribuida
<b>DNP</b>	<i>Dry Non-Polish</i> (Conector) Seco no lijado
<b>ELED</b>	<i>Edge Light Emitting Diode</i> Diodo emisor de luz de borde
<b>EMI</b>	<i>Electromagnetic Interference</i> Interferencia electromagnética
<b>FDDI</b>	<i>Fiber Distributed Data Interface</i> Interfaz de datos distribuidos a través de fibra
<b>GbE</b>	<i>Giga bit Ethernet</i>
<b>GI-POF</b>	<i>Graded Index Plastic Optic Fiber</i> Fibra óptica de plástico de índice gradual
<b>GOF</b>	<i>Glass Optic Fiber</i> Fibra óptica de plástico
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i> Red de área local
<b>LASER</b>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> Luz amplificada por emisión estimulada por radiación
<b>LD</b>	<i>LASER Diode</i> Diodo LASER
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i> Diodo emisor de luz

<b>NIC</b>	<i>Network Interface Card</i> Tarjeta de interfase de red
<b>OPM</b>	<i>Optical Power Meter</i> Medidor de potencia óptica
<b>OTDR</b>	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i> Reflecto-metro óptico en el dominio del tiempo
<b>PAM</b>	<i>Pulse Amplitude Modulation</i> Modulación de amplitud de pulso
<b>PBT</b>	<i>Poly-Butylene Terephthalate</i> Politereftalato de butileno
<b>PIN</b>	(Semiconductor) Positivo Intrínseco Negativo
<b>PMMA</b>	Poli-Metil <i>Metacrilato</i>
<b>POF</b>	<i>Plastic Optic Fiber</i> Fibra óptica de plástico
<b>RCLED</b>	<i>Resonant Cavity Ligh Emitting Diode</i> Diodo emisor de luz de cavidad resonante
<b>S/N</b>	Relación señal a ruido
<b>SC</b>	<i>Standard Connector</i> Conector Standard
<b>SLED</b>	<i>Surface Light Emitting Diode</i> Diodo emisor de luz por superficie
<b>SMA</b>	(Conector) Sub-Miniature version A
<b>ST</b>	<i>Straight Tip</i> (Conector) Punta fija
<b>TTL</b>	<i>Transistor-Transistor Logic</i> Lógica transistor-transistor
<b>UTP</b>	<i>Unshielded Twisted Pair</i> Par trenzado sin escudo
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>VCSEL</b>	<i>Vertical-Cavity LASER</i> LASER de cavidad vertical y emisión por superficie
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> Multiplexado por longitud de onda

## INDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1.1 Radiación lumínica e infrarroja dentro del espectro electromagnético.....	7
Figura 1.2. Doblaje de un rayo de luz en un límite óptico.....	12
Figura 1.3. Experimento de Tyndall: Guiar la luz en un arco de agua descendiente.....	18
Figura 1.4. Fibra óptica demarcada su ángulo de aceptación AN.....	19
Figura 2.1. Corte longitudinal de un LED.....	25
Figura 2.2. Banda de valencia de un LED.....	27
Figura 2.3. Átomo con electrones pasando de un estado cargado a uno relajado.....	28
Figura 2.4. Diodo ELED o de borde de emisor.....	31
Figura 2.5. LED de cavidad resonante.....	33
Figura 2.6. Componentes internos de un semiconductor diodo LASER.....	36
Figura 2.7. Potencia óptica de salida vs. corriente para LED y LD.....	38
Figura 2.8. Patrones de emisión LD y LED.....	41
Figura 2.9. Estructura de un foto-receptor.....	44
Figura 2.10. Respuesta de un fotodiodo de silicio versus longitud de onda.....	45
Figura 2.11. Corte transversal de un fotodiodo PIN.....	47
Figura 2.12. Incremento de corriente con un factor de multiplicación APD versus voltaje aplicado.....	49
Figura 2.13. Corte de un fototransistor.....	52
Figura 2.14. Esquema eléctrico de un fotodarlington.....	53
Figura 2.15. Viaje de un rayo en un conductor óptico.....	55
Figura 2.16. Corte transversal de un cable de fibra óptica.....	56
Figura 2.17. Propagación de los rayos sesgados.....	57
Figura 2.18. Modos de propagación de orden alto y bajo.....	59
Figura 2.19. Fibra óptica de índice escalón.....	63
Figura 2.20. Fibra óptica de índice gradual.....	64
Figura 2.21. Fibra óptica mono-modo.....	66
Figura 2.22. Atenuación para fibra óptica (a) de plástico (b) de vidrio.....	71
Figura 2.23. Curva del filtro pasabajos de Gauss.....	75
Figura 2.24. Ilustración de la dispersión en fibra óptica.....	79
Figura 2.25. Ilustración de diferentes tipos de dispersión.....	82
Figura 2.26. Pérdidas por micro dobleces.....	84

Figura 2.27. Corte de una fibra óptica.....	87
Figura 2.28. Estructura molecular del PMMA.....	92
Figura 2.29. Estructura molecular del CYTOP.....	93
Figura 2.30. Modelo cilíndrico.....	94
Figura 2.31. Proceso de síntesis por horneado.....	96
Figura 2.32. Hilado por derretimiento.....	97
Figura 2.33. Hilado cruzado UV.....	98
Figura 2.34. Comparación de la fibra plástica con otros medios de transmisión.....	105
Figura 2.35. Diversas aplicaciones de la fibra plástica.....	108
Figura 2.36. Vehículo con servicios multimedia equipado con POF.....	110
Figura 2.37. Redes en automóviles.....	111
Figura 2.38. Iluminación ornamental con fibra óptica plástica.....	113
Figura 2.39. Sensores de pruebas ópticas.....	115
Figura 2.40. Multimedia integrada con POF en el hogar.....	117
Figura 3.1. Elementos más comunes en un transmisor de fibra óptica.....	124
Figura 3.2. Elementos más comunes en un receptor de fibra óptica. ....	127
Figura 3.3. Diagrama de bloques general del transmisor.....	134
Figura 3.4. Diagrama de bloques del transmisor digital.....	135
Figura 3.5. Corte transversal del LED en la estructura de PBT.....	137
Figura 3.6. Esquema del manejador de corriente.....	139
Figura 3.7. Esquema del transmisor digital.....	144
Figura 3.8. Esquema de un modulador digital básico.....	145
Figura 3.9. Diagrama esquemático del circuito transmisor digital.....	154
Figura 3.10. Diagrama de bloques general del receptor.....	159
Figura 3.11. Diagrama de bloques del receptor digital.....	160
Figura 3.12. Corte transversal del fotodiodo en su alojamiento de PBT.....	161
Figura 3.13. Red de transimpedancia básica.....	163
Figura 3.14. Cambiador de nivel.....	168
Figura 3.15. Conector de fibra ST con cable de fibra óptica.....	176
Figura 3.16. Conector de fibra FC con fibra de vidrio instalada.....	179
Figura 3.17. Conector DNP simple con 1000 um de núcleo de fibra óptica de plástico.....	180
Figura 3.18. Pérdidas Intrínsecas en las fibras ópticas.....	183
Figura 3.19. Pérdidas extrínsecas en las fibras ópticas.....	184
Figura 3.20. Medidor de Potencia Óptica con fuente de luz incluida.....	189
Figura 3.21. OTDR.....	190
Figura 3.22. Ponchadora.....	193

## INDICE DE TABLAS

	<b>Páginas</b>
Tabla 1.1. Índice de refracción de algunos materiales comunes.....	11
Tabla 2.1. Elementos comúnmente usados para hacer LED y LASER y sus características de salida.....	24
Tabla 2.2. Materiales de los fotodetectores y sus regiones activas.....	42
Tabla 3.1. Comparación entre conectores y empalmes para fibras ópticas.....	187

## INTRODUCCION

Debido a que el laboratorio de telecomunicaciones no cuenta con una plataforma para desarrollar prácticas basadas en la implementación de la fibra óptica como medio de transmisión, consideramos oportuno plantear una solución que permita al estudiante poner en práctica sus conocimientos teóricos adquiridos tanto en el área electrónica como en el área de las telecomunicaciones.

Para llevar a cabo el objetivo principal de esta tesis hemos dividido la propuesta en dos segmentos:

- Diseñar un sistema de transmisión y recepción de señales analógicas y digitales sobre fibra óptica.
- Elaborar un manual prácticas de laboratorio donde experimentalmente se puedan apreciar los diferentes parámetros y efectos propios de un sistema de transmisión sobre fibra óptica, haciendo uso del diseño propuesto en el objetivo anterior.

A la par que se cumplan estos objetivos, el prototipo para transmisión y recepción de señales sobre fibra óptica buscará llenar expectativas en el plano educativo, sin descuidar el plano económico.

Para el campo educativo, se podrá tener apreciaciones prácticas de los diferentes parámetros asociados a la transmisión sobre fibra óptica.

En el campo económico se persigue reducir costos con la implementación de nuevas tendencias tecnológicas en el área de la transmisión óptica. Esto se conseguirá mediante el empleo de la fibra óptica de plástico, cuyas propiedades y eficiencia emulan el desempeño y comportamiento de la fibra óptica de vidrio, y han hecho que su uso se vea cada vez más solicitado en el área industrial, aérea, naval y automotriz.

La transmisión sobre fibra óptica así como otros tipos de transmisiones, basan la eficiencia de su rendimiento en la medición de parámetros y su optimización. Dichos parámetros al ser medidos permiten puntualizar características propias de un medio y de un sistema en específico.

La medición de parámetros será enfocada a la utilización y optimización de la infraestructura ya existente en los laboratorios de la universidad. La medición de parámetros debe ser una herramienta básica para estudiantes y profesionales, ya que a través de estos se podrán obtener recursos necesarios para poder implementar determinado tipo de diseño.

El estudiante que estará haciendo uso de esta plataforma de entrenamiento necesitará ser guiado tanto en la etapa de montaje de la transmisión como en la fase de medición de parámetros. Es por esta razón que este proyecto cuenta como herramienta principal la elaboración de una guía documentada para que el estudiante realice las diferentes actividades prácticas sin ningún problema y con la mayor seguridad posible.

# CAPITULO 1

## 1. PRINCIPIOS FISICOS DE LA LUZ EN UN MEDIO GUIADO.

Antes de explicar directamente que es la fibra óptica, conviene repasar ciertos aspectos básicos de la óptica. La luz es una forma de radiación electromagnética similar al calor radiante, las ondas de radio o los rayos X. Las diferentes sensaciones de color corresponden a luz que vibra con distintas frecuencias. La luz es emitida por sus fuentes en línea recta, y se difunde en una superficie cada vez mayor a medida que avanza. Cuando la luz incide sobre un objeto es absorbida o reflejada, este campo que se ocupa de la aplicación de las leyes de reflexión y refracción de la luz dentro de un medio determinado, se conoce como óptica geométrica.

### 1.1. Parámetros ópticos de la luz en un medio guiado.

Los trabajos en una fibra óptica dependen de varios principios y de interacciones entre la luz y el medio. El primer paso es comprender qué es la luz. Webster<sup>1</sup> provee dos definiciones válidas para la luz:

1. Algo que hace posible la visión.
2. La sensación despertada por el estímulo de los receptores visuales.

Sin embargo, la transmisión de luz por fibra óptica incluye una tercera definición que dice: “La luz es una radiación o energía electromagnética ubicada en los rangos de longitud de onda correspondientes a infrarrojos, espectro visible y ultravioleta”.<sup>2</sup>

Desde un punto de vista físico, la luz puede ser representada como dos “personalidades”: una personalidad corpuscular y una personalidad fotónica. Esta es la famosa teoría dual de la luz onda-partícula.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Merriam-Webster ©, The New Merriam-Webster Dictionary, 1989.

<sup>2</sup> Luz, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). Enciclopedia libre.

<sup>3</sup> La teoría corpuscular fue defendida por Newton mientras la teoría del efecto fotoeléctrico fue publicada por Einstein.

Paul G. Hewitt: *Física conceptual (Segunda Edición)*, Addison-Wesley, 1995.

### 1.1.1. La luz como parte del espectro electromagnético.

Muchas de las propiedades de la luz pueden ser explicadas pensando en ella como ondas electromagnéticas. La luz es solo una pequeña parte del espectro electromagnético como se puede apreciar en el figura 1.1. La luz es de alta frecuencia pero con una longitud de onda más corta que las de ondas de radios. La luz visible empieza en la longitud de onda de los 380 nanómetros (cerca de color violeta) hasta los 750 nanómetros (cerca del color rojo). Las radiaciones infrarrojas tienen longitudes de onda más largas que la de la luz visible, y muchos de los sistemas de fibra óptica usan la luz infrarroja situada entre los 850 y los 1550 nanómetros.

La luz usualmente es clasificada por longitud de onda. A menor longitud de onda mayor frecuencia. Si se conoce la una, se puede determinar la otra y matemáticamente su relación es:

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

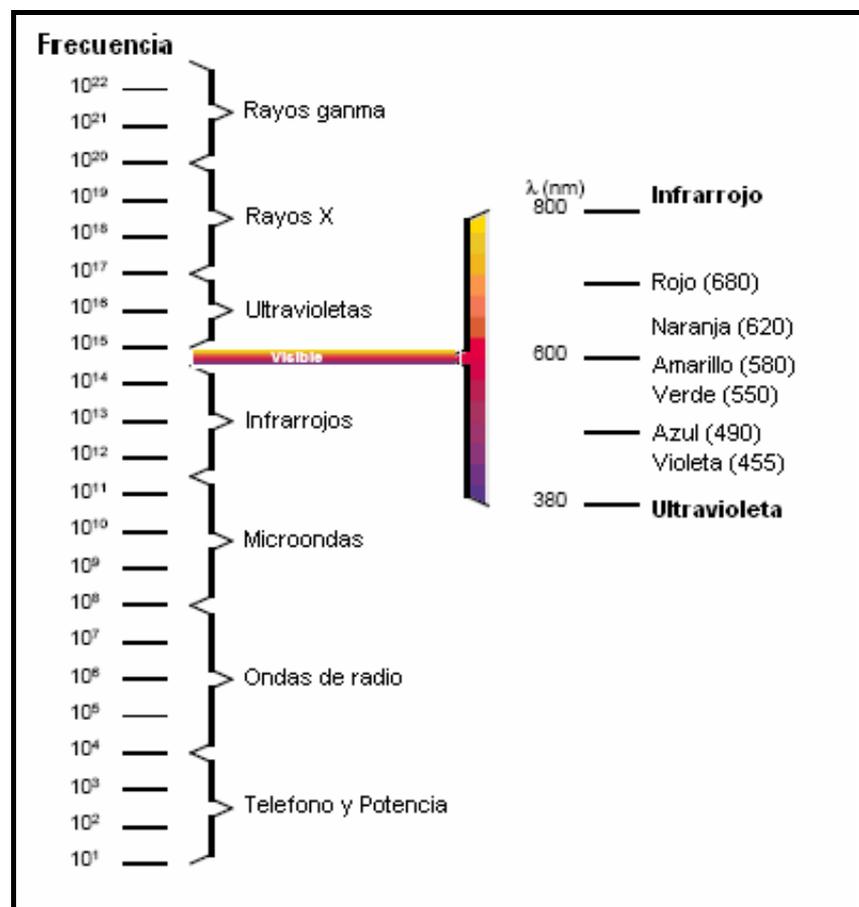
(1.1.)

Donde,

$\lambda$  es la longitud de onda

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío y

$f$  es la frecuencia



**Figura 1.1. Radiación lumínica e infrarroja dentro del espectro electromagnético.**

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.

Aunque, la luz también expone propiedades de partícula. Una partícula de luz es llamada fotón (una unidad individual de energía). La energía que contiene un fotón depende de su frecuencia. A mayor frecuencia, mayor energía. La energía ( $E$ ) que contiene un fotón es medida en joules, y es igual a la frecuencia ( $f$ ), medida en Hertzios, multiplicada por la constante de Planck<sup>1</sup>:

$$E = h \times f$$

(1.2.)

Donde la constante de Planck equivale a  $6.63 \times 10^{-34}$  J·s

---

<sup>1</sup> Planck, Max. Físico alemán considerado como el fundador de la teoría cuántica. Enciclopedia Británica Onceava Edición.

Tratar a la luz como tanto como una onda o como una partícula nos ayuda a comprender en totalidad su comportamiento dentro de un medio óptico guiado. En algunas ocasiones es necesario variar entre las dos definiciones para entender sus diferentes efectos. Por ejemplo, muchas propiedades de la fibra óptica varían con la longitud de onda, por ende, la definición de luz como onda es usada. En otras ocasiones, como en el caso de los detectores ópticos o en el caso de la respuesta foto-eléctrica de un foto-detector, esta es explicada de mejor manera usando la teoría de luz-partícula.

La teoría de la luz como onda se remonta hasta los tiempos de Galileo Galilei, pero la teoría de partícula fue desarrollada recientemente con la teoría Moderna de la Física de Einstein.

## **1.2. PARAMETROS GEOMETRICOS DE LA LUZ EN MEDIOS GUIADOS.**

Una de las observaciones que se hacen más evidentes en cuanto a la luz es su propagación rectilínea. El simple hecho de familiarizarse con eventos cotidianos como un haz de luz que pasa

a través de una rendija, observar una sombra bien definida en una pantalla colocada atrás de un objeto, y otros fenómenos nos demuestra esto. Es decir, que la luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones; estas líneas rectas se conocen como rayos de luz y representan el camino que describe la luz o la dirección en que la perturbación luminosa se propaga. Por lo tanto, la luz adopta ahora una nueva postura, la de un rayo luminoso que marca una trayectoria rectilínea en su viaje. Y, para describir los mecanismos de propagación de la luz a través de una fibra óptica utilizaremos la óptica geométrica donde la luz se considera como rayos angostos.

### **1.2.1. Índice de refracción.**

La medida óptica mas importante en cualquier material transparente es su índice de refracción  $n$ . El índice de refracción de cualquier medio conductor de luz se refiere a la tasa o relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho medio. La velocidad de la luz en cualquier material es siempre menor a la de la luz en el vacío, por lo tanto todos los índices de refracción son siempre mayores que uno, observando la tabla 1.1 podemos encontrar los índices de refracción de algunos materiales.

MATERIAL	INDICE DE REFRACCION
Vacío	1
Aire	1,00029
Agua	1,33
Cuarzo	1,46
Vidrio	1,45 - 1,6
Diamante	2
Silicio	3,4
Arseniuro de Galio (GaAs)	3,6

**Tabla 1.1. Índice de refracción de algunos materiales comunes.**

En la práctica, los índices de refracción de los materiales son medidos comparando la velocidad de la luz en ellos con la velocidad de la luz en el aire, reemplazando esta última a la del vacío. Esto simplifica las mediciones y realiza una comparación más práctica, ya que el índice de la luz en el aire es muy cercano a la del vacío.

### 1.2.2. Leyes de Snell.

La luz viaja en línea recta a través de la mayoría de los materiales ópticos. Sin embargo, cuando la luz viaja en un medio y en su frontera se encuentra con otro medio diferente, algo distinto ocurre. Si los índices de refracción de los dos materiales son diferentes, la luz cambia su trayectoria en la frontera de los materiales. En la figura 1.2, se puede observar lo que ocurre cuando un haz de luz atraviesa un pedazo de vidrio que tiene un índice de refracción distinto al del aire.

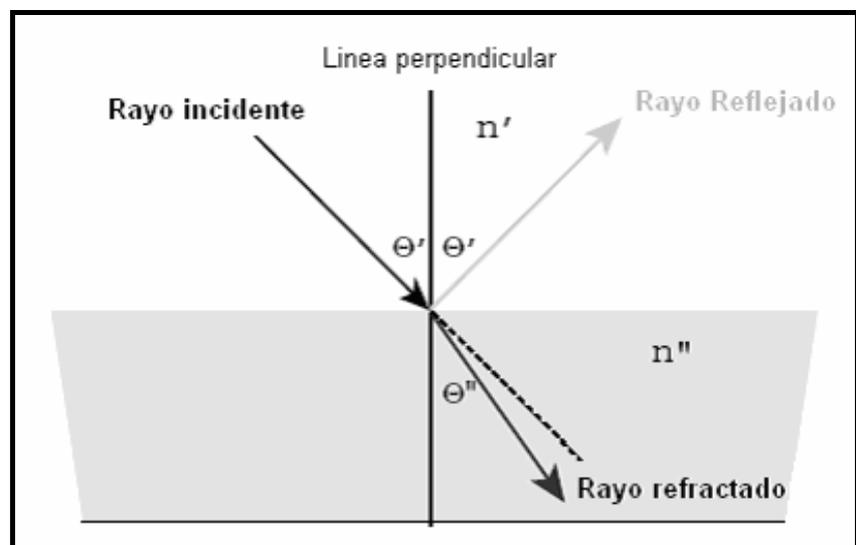


Figura 1.2. Doblaje de un rayo de luz en un límite óptico.

El cambio de trayectoria del rayo de luz depende del índice de refracción de los dos materiales y del ángulo de incidencia con la que el rayo golpea a la frontera entre los dos medios. Los ángulos de incidencia y refracción son medidos desde una línea perpendicular a la superficie del medio. La relación matemática entre el rayo incidente y el rayo refractado fue en principio citado por el científico Willebord Snell.<sup>1</sup> Las Leyes de Snell describen el cambio de trayectoria de la luz al pasar de un medio a otro. Las Leyes de Snell citan:

$$\eta' \cdot \sin \theta' = \eta'' \cdot \sin \theta''$$

(1.3.)

Donde  $\eta'$  y  $\eta''$  son los índices de refracción en el primer y el segundo medio respectivamente, mientras que  $\theta'$  y  $\theta''$  son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente.

---

<sup>1</sup> Snell, Willebrord. Nacido como Willebrord Snel van Royen, fue un astrónomo y matemático holandés conocido por la ley de refracción ahora conocida como ley de Snell. Enciclopedia Británica Onceava Edición.

Sin embargo, cuando la luz pasa de un medio a otro, siempre una pequeña parte de ella se refleja en el primer material. Este fenómeno es conocido como reflexión de Fresnel<sup>1</sup>. A mayor diferencia entre los índices de reflexión en los materiales, mayor será la reflexión de Fresnel.

### **1.2.3. Ángulo Crítico.**

Las Leyes de Snell indican que la refracción no es válida cuando el ángulo de incidencia empieza a hacerse muy grande (siempre y cuando la luz viaje de un medio con alto índice a uno con menor índice de reflexión). Si el ángulo excede su valor crítico, es decir, donde el seno del ángulo es igual a uno, la luz no podrá pasar la frontera. Toda la potencia lumínica es reflejada cuando el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico. Este fenómeno es llamado reflexión total interna; y es este fenómeno el que será la base fundamental del proceso de viaje de la luz dentro de la fibra óptica. El ángulo crítico en el cual la reflexión total interna ocurre puede ser fácilmente derivado de las Leyes de Snell.

---

<sup>1</sup> Fresnel, Augustin-Jean. Físico francés que contribuyo significativamente al establecimiento de la teoría de óptica de ondas. Enciclopedia Británica Onceava Edición.

#### 1.2.4. Reflexión total interna.

En algunos casos, cuando la luz incide sobre la superficie de separación entre dos medios, una parte del rayo de luz puede ser reflejado en el medio de donde esta tratando de escapar para continuar hacia el segundo medio.

Puede no ser obvio de deducirlo de la ley de Snell, pero una simple ecuación puede ser usada para explicar porque la luz algunas veces es reflejada hacia el medio que trata de dejar. Empecemos asumiendo que el material  $\eta'$  tiene un índice de refracción mucho mayor que  $\eta''$ . Tomando en cuenta que el seno de los ángulos  $\theta'$  o  $\theta''$  nunca puede ser mayor a 1, y si es que el índice de refracción  $\eta'/\eta''$  y el producto de seno de  $\theta''$  no es mayor a 1, una solución no realizable para  $\theta'$  existe. Cuando esto ocurre, toda la luz es reflejada en  $\eta'$ , y el ángulo con el que ocurre es:

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{\sin \theta'' \cdot \eta''}{\eta'}\right)$$

(1.4.)

La reflexión total interna únicamente puede ocurrir cuando un rayo luminoso incide de una sustancia ópticamente más densa sobre otra ópticamente menos densa y nunca se da el caso inverso. La reflexión total hace posible guiar la luz de un lugar a otro por un tubo de vidrio o plástico transparente. Penetrando la luz en un extremo con las curvaturas apropiadas del tubo y reflejándose totalmente en forma sucesiva, toda la luz que penetra emerge en el otro extremo.

El rayo que se refleja totalmente o ya sea este producto de una simple reflexión de Fresnel, tiene las siguientes características:

- 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 de reflexión iguales.

En la figura 1.3 se tiene una recreación del experimento realizado por Tyndall<sup>1</sup> en 1870. Tyndall demostró como guiar un rayo de luz a través de un chorro de agua que estaba cayendo en un recipiente.

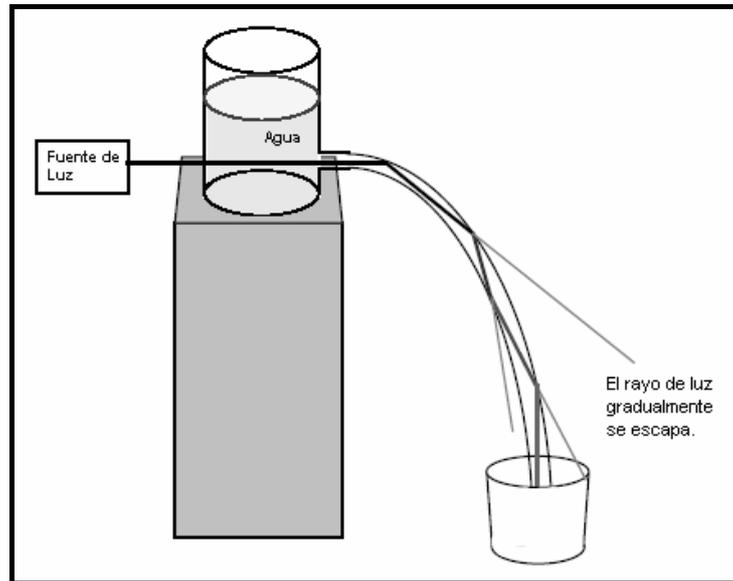
El tanque de agua contaba con un tubo horizontal en la parte inferior que permitía que el agua fluya fuera del tanque en forma de un arco que caería en un recipiente en el piso.

Una luz brillante producida por una fuente era dirigida hacia el tubo y los rayos de luz viajaban con el chorro de agua hasta que se separaban por la turbulencia que causaba el agua cuando chocaba con el recipiente.

Tyndall sabía que la luz estaba atrapada temporalmente dentro del chorro de agua, pero no podía explicar porque. En la actualidad usando una combinación de matemáticas y ciencia encontramos la respuesta. El experimento demostró el principio conocido como reflexión total interna.

---

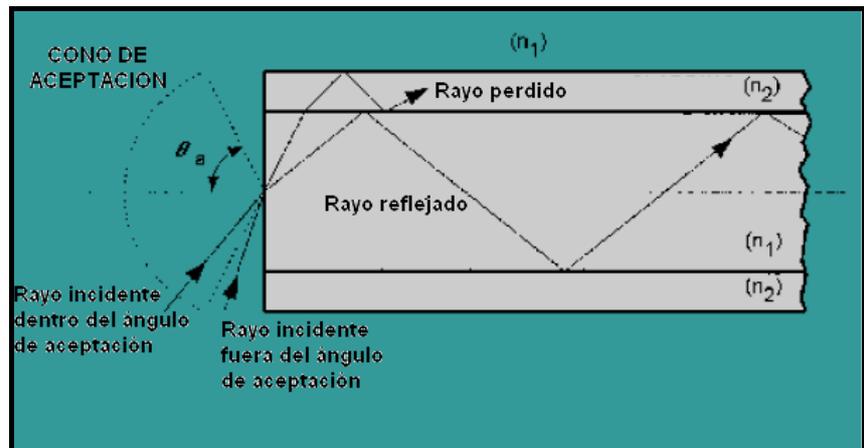
<sup>1</sup> Tyndall, John. Filósofo y físico irlandés, sus mayores contribuciones fueron en el campo físico y químico. Enciclopedia Británica Onceava Edición.



**Figura 1.3. Experimento de Tyndall: Guiar la luz en un arco de agua descendiente**

### 1.2.5. Apertura Numérica.

La apertura numérica es una medida de capacidad de la fibra para capturar luz y como ya se dijo, se utiliza el efecto de reflexión total interna para conducir un rayo luminoso en una fibra óptica: donde el núcleo está formado por un material con un índice de refracción  $n_1$  (vidrio o plástico) y envolviéndolo, un recubrimiento formado por un material similar al núcleo pero con índice de refracción  $n_2$ , siendo  $n_2$  algo menor que  $n_1$ .



**Figura 1.4. Fibra óptica demarcada su ángulo de aceptación o AN.<sup>1</sup>**

Al seno del ángulo de aceptación se lo denomina apertura numérica y está solo en función de los índices de refracción. Por lo tanto la apertura numérica (NA) de una fibra óptica se refiere al ángulo crítico y es mayormente definida como una característica de la fibra óptica aunque también será una característica importante de los emisores de luz.

$$NA = \sin \theta_{MAX} = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

(1.5.)

<sup>1</sup> NEETS, MODULE 24--INTRODUCTION TO FIBER OPTICS,  
<http://www.tpub.com/neets/book24>.

## **CAPITULO 2**

### **2. DISPOSITIVOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICO.**

Un sistema de comunicaciones es un método, forma o manera de transportar información de un lugar a otro. Y un sistema de comunicaciones óptico, es aquel que utiliza la fibra óptica como medio de transmisión, llevando luz en lugar de electrones como es en el caso de los cables de cobre.

Un sistema de fibra óptica como cualquier sistema de comunicaciones se forma por tres partes principales que son el transmisor, el receptor y el medio de transmisión. Donde los elementos más importantes, a parte

del pilar fundamental que es el cable de fibra óptica, son los transductores (dispositivos que convierten un determinado tipo de energía a la entrada, en otro distinto a la salida) electro-ópticos ubicados tanto en el transmisor (foto-emisores) como en el receptor (foto-detectores), los cuales convierten la energía óptica transportada por la fibra en energía eléctrica y viceversa.

Estos tres elementos principales poseen muchas características las cuales los dividen en diversos tipos y familias con distintas aplicaciones y usos que serán analizados a continuación.

### **2.1. Fotoemisores.**

Un fotoemisor es una fuente que convierte energía eléctrica (corriente) en energía óptica (luz). La luz emitida por la fuente óptica es enviada, o acoplada a una fibra óptica para ser transmitida. El rendimiento de un enlace de fibra óptica depende de la cantidad de potencia óptica (luz) enviada por la fibra.

Los Diodos Emisores de Luz (LED) y los diodos de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (LASER) son las fuentes ópticas más comunes en transmisores de fibra. Juntos

representan el 95 y 99 % de las aplicaciones de comunicaciones ópticas.

El desarrollo de semiconductores eficientes como fuentes ópticas, junto con fibras ópticas de baja pérdida, dan paso a mejoras en las comunicaciones de fibra óptica. Los semiconductores como fuentes ópticas tienen las características físicas y el rendimiento necesario para exitosas implementaciones de sistemas ópticos.

Es deseable que las fuentes ópticas:

- Sean compatibles en tamaño respecto a la fibra óptica, teniendo así una pequeña área de luz emitida capaz de enviar dicha luz a la fibra.
- Envíen suficiente potencia óptica a la fibra para así superar la atenuación en ella y las pérdidas en los conectores, permitiendo la detección de la señal en el receptor.
- Emitan luz a longitudes de onda donde la pérdida por dispersión y la pérdida en la fibra sean mínimas.

### **2.1.1. Diodos LED.**

Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor que emite luz no coherente, mediante emisión espontánea, cuando es excitado por corriente eléctrica.

Entre las características de los LED tenemos que son:

- Resistentes.
- Larga vida.
- Bajo costo.
- Fácilmente manejados por circuitos electrónicos.
- Requieren bajos niveles de corriente y voltaje.
- Pueden ser modulados a altas velocidades.

La luz de los LED esta disponible en una variedad de colores o longitudes de onda. El color de luz emitido por el LED depende del material semiconductor usado. La luz producida por un LED es pobremente considerada monocromática o consistente de una sola longitud de onda.

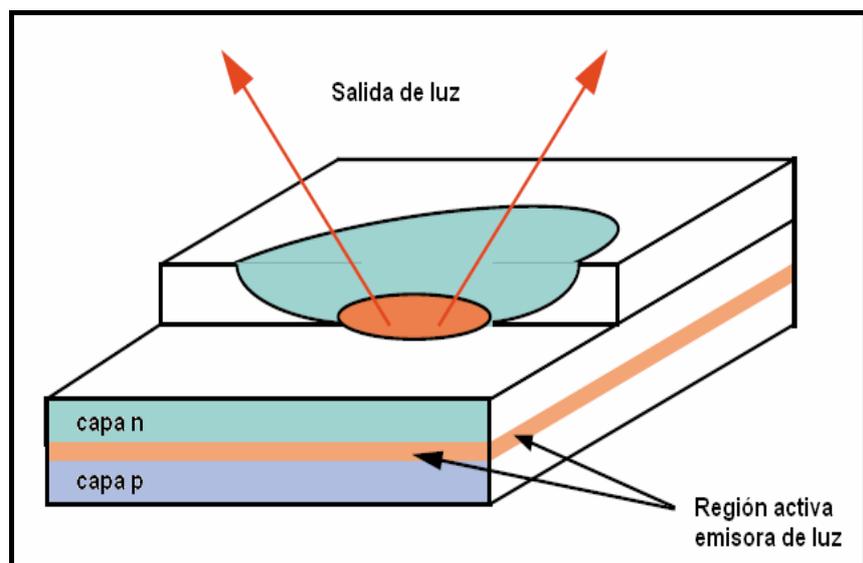
Los LED convencionalmente usan semiconductores inorgánicos como GaAlAs (arseniuro de galio aluminio) para longitudes de onda cortas, y InGaAsP (indio galio arsénico fósforo) para longitudes de onda mas largas. También se usan otros materiales para otras longitudes de onda.

En la tabla 2.1 se encuentran algunos de los materiales con sus respectivas longitudes de onda y colores de emisión.

MATERIAL	COLOR	$\lambda$
Fósforo de Galio (GaP)	verde	560 nm.
Arseniuro Fósforo de Galio (GaAsP)	amarillo-rojo	570-700 nm.
Arseniuro de Galio y Aluminio (AlGaAs)	infrarrojo	800-900 nm.
Arseniuro de Galio (GaAs)	infrarrojo	930 nm.
Arseniuro de Indio Galio Fósforo (InGaPAs)	infrarrojo	1300-1500 nm.

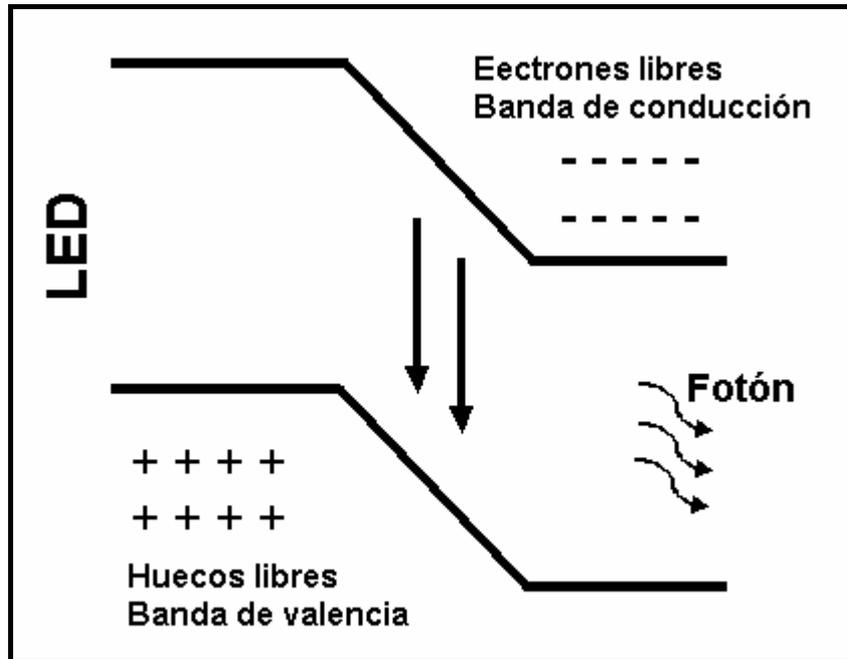
**Tabla 2.1. Elementos comúnmente usados para hacer LED y LASERs y sus características de salida.**

Un LED emite luz en todas direcciones al azar. Sin embargo, algunos LED usados en sistemas de fibra óptica son contruidos para optimizar la luz desde una superficie particular como la mostrada en la figura 2.1. El LED mostrado tiene un hueco que incrementa la cantidad de luz emitida desde la parte alta de la superficie. Con esto se logra que más luz entre en la fibra porque se encuentra más cerca del lugar donde se origina la luz.



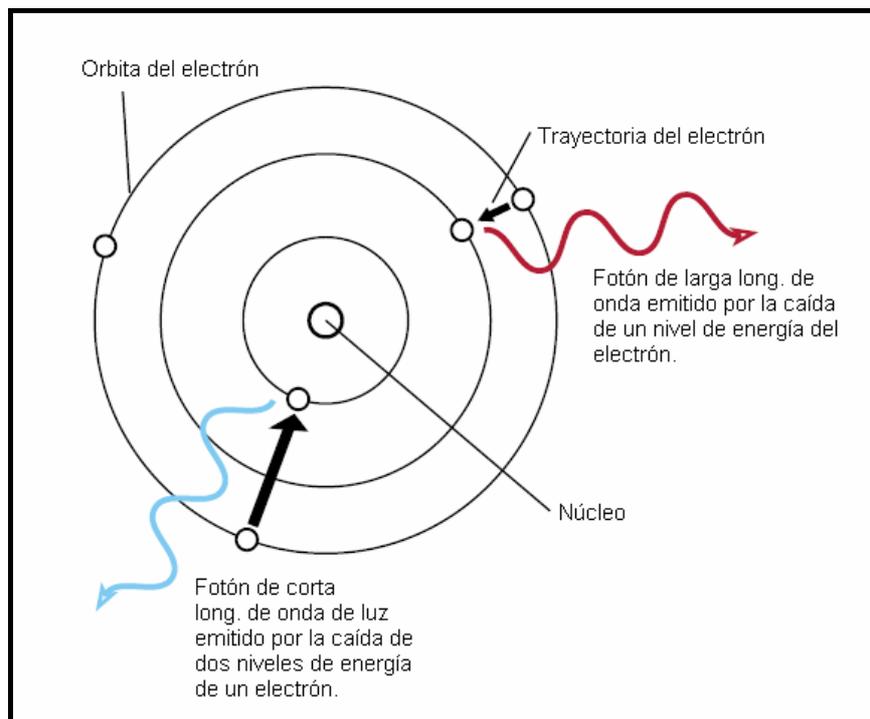
**Figura 2.1. Corte longitudinal de un LED.**

Cuando corriente eléctrica fluye por el LED o sea cuando está polarizado, los electrones pasan a través de las capas de material semiconductor y son absorbidos en la capa de empobrecimiento del mismo (banda de valencia). Cuando un átomo absorbe un electrón en la capa de empobrecimiento, uno de los electrones que se encuentra orbitando se mueve a una capa de mayor valencia. En este estado, el átomo y el electrón en órbita son inestables y querrán eventualmente regresar a su estado de descanso o normal. Cuando el electrón realiza una transición de un estado cargado a un estado de descanso la energía absorbida debe ser removida o emitida por el átomo, como se observa en la figura 2.2. La energía emitida se encuentra en forma de una partícula sin masa llamada fotón. El proceso de generar fotones a través de electrones que cambian de una banda de mayor energía a otra de menor energía, en manera natural o aleatoria, es llamado emisión espontánea de radiación.



**Figura 2.2. Banda de valencia de un LED.**

Toda la luz producida por un LED es no coherente. Esto significa que los rayos de luz, o fotones, viajan en cualquier dirección, fase y frecuencia con respecto a cada uno.



**Figura 2.3. Átomo con electrones pasando de un estado cargado a uno relajado.**

Los LED tienen características que definen su utilidad en diferentes aplicaciones, entre estas tenemos:

*Longitud de onda pico:* Esta es la longitud de onda en la cual la fuente emite la mayor potencia. Esta debe coincidir con la longitud de onda que posee menos pérdida en la fibra óptica. Los LED por lo general trabajan en el espectro visible con las longitudes de onda del rojo a 660 nm, el verde a 530 nm y el infrarrojo a 850, 950, 1300 y 1550 nm.

*Ancho espectral:* Debido a que las fibras ópticas son sensibles a todas las longitudes de ondas, el ancho espectral de frecuencia es muy importante. El ancho de banda espectral es el ancho de banda óptico al cual la intensidad de emisión cae al 50% de su pico, y es algunas veces conocido como ancho de banda máximo-medio, típicamente ubicado en los LED entre los 20 y 60 nm de la longitud de onda pico.

*Patrón de emisión:* El patrón de luz emitida afecta la cantidad de luz que puede ser transmitida a la fibra óptica. El tamaño de emisión debe ser similar al diámetro del núcleo de la fibra.

*Potencia:* Los mejores resultados se logran al acoplar la mayor cantidad de potencia posible en la fibra. El requerimiento clave es que la potencia de la fuente sea suficiente para transmitir tanta luz como requiere el receptor en el otro extremo de la fibra, especialmente en los LED. La potencia característica que pueden transmitir los LED es alrededor de 500  $\mu\text{W}$ .

*Velocidad:* Una fuente debe prenderse y apagarse lo suficientemente rápido para poder cubrir el ancho de banda de un sistema. La velocidad de la fuente óptica es determinada por los tiempos de subida y de bajada. En los LED estas velocidades se acercan a los 100 MHz.

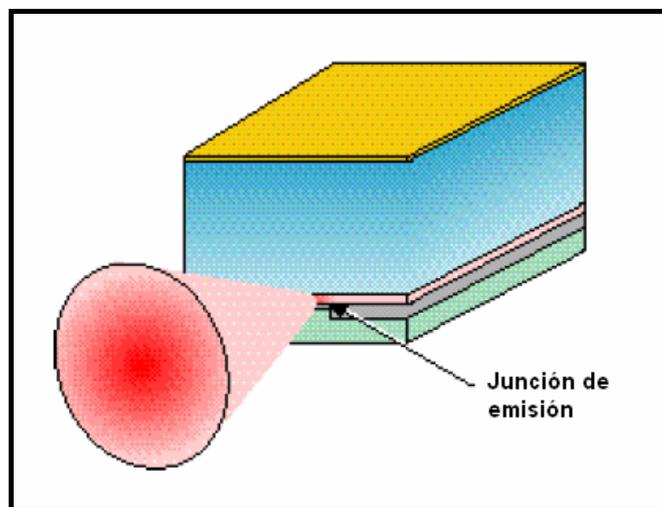
*Linealidad:* Es otra característica importante para ciertas aplicaciones. La linealidad representa la relación entre la potencia óptica a la salida del LED contra la corriente eléctrica que excita al LED. La mayoría de fuentes de luz tienen mínima pérdida de linealidad, lo cual los hace ideales para aplicaciones digitales. Aplicaciones analógicas requieren más atención a la linealidad.

### *Tipos de LED*

Entre los tipos de LED más usados para comunicaciones de fibra óptica tenemos al LED de superficie emisora (SLED) y el LED de borde emisor (ELED).

Los LED de borde emisor son dispositivos más complejos y más costosos, pero ofrecen grandes niveles de potencia y altas velocidades. La potencia que entregan es alta porque el lugar de emisión es pequeño, alrededor de 30-50  $\mu\text{m}$ , permitiendo una buena eficiencia de acople con fibras ópticas de tamaño similar.

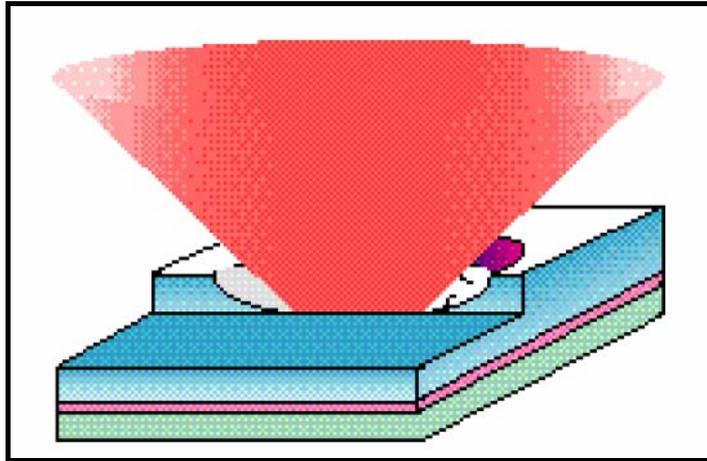
Los emisores de borde tienen un espectro de emisión estrecho lo cual permite transmitir potencia en fibras con apertura numérica de menor magnitud.



**Figura 2.4. Diodo ELED o de borde de emisor.**

Una variante del emisor de borde es el LED superradiante; se puede decir que tiene partes de LED y partes de LASER. Usualmente tienen una alta densidad de potencia y poseen ganancia óptica como los LASER, pero su emisión es no coherente al contrario del LASER.

El LED de superficie emisora tiene una estructura más simple y es relativamente menos costoso, se los encuentra desde potencias bajas a potencias medianas, así como también trabaja a velocidades bajas o moderadas. La potencia que entrega es mayor que la de un ELED, pero el área de emisión es grande, causando baja eficiencia de acople con la fibra óptica. Añadiendo a esto que los SLED emiten luz en todas las direcciones y apenas una parte de la luz emitida estará en la dirección correcta para entrar a la fibra óptica.



**Figura 2.5. LED de cavidad resonante.**

Como último tipo de LED tenemos al LED de cavidad resonante (RCLED – ver figura 2.5), básicamente este nuevo tipo de LED toma ventaja de efectos de cavidad para aumentar la emisión espontánea. El RCLED tiene un ancho espectral mucho más estrecho. También cuenta con mejor direccionalidad, lo que permite mejores acoples con la fibra óptica que se use.

### **2.1.2. Diodos LASER.**

Los diodos LASER o de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación son semiconductores complejos que convierten corriente eléctrica en luz. El proceso de conversión es eficiente ya que no genera mucho calor.

Tenemos entre las características de los diodos LASER:

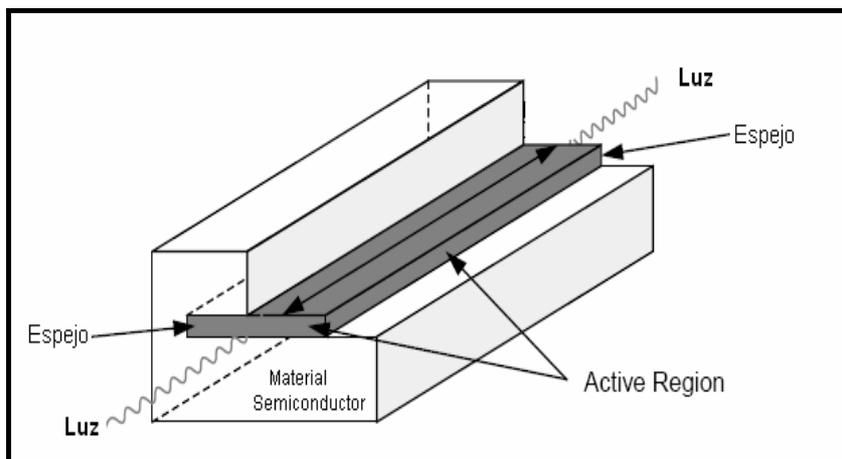
- Emite alta densidad de luz en una muy pequeña área.
- El área de emisión de luz es muy pequeña comparada con el tamaño de la fibra.
- También tienen un largo periodo de vida útil.
- Pueden ser modulados a altas velocidades.

El diodo LASER, como otros semiconductores, es formado al dopar una delgada capa en la superficie de un cristal. El cristal es dopado para producir una región tipo n y una tipo p, una sobre la otra, resultando en una unión p-n, o más conocida como diodo.

Como en otros diodos, cuando esta estructura está polarizada, huecos de la región p son inyectados a la región n, donde los electrones son los portadores dominantes o mayoritarios. Similarmente, electrones de la región n son inyectados en la región p, donde los huecos son comunes. Cuando un electrón y un hueco están presentes en la misma región, ellos se recombinan por emisión espontánea, esto es, un electrón reocupa el estado de energía del hueco,

emitiendo un fotón con energía igual a la diferencia entre el electrón y el hueco involucrados. La emisión espontánea es necesaria para iniciar la oscilación del LASER, pero es una fuente de ineficiencia una vez que el LASER esta oscilando.

Bajo las condiciones apropiadas, el electrón y el hueco pueden coexistir en la misma área por algún tiempo (en el orden de microsegundos) antes de recombinarse. Después un fotón cercano con energía igual a la energía de recombinación puede causar recombinación por emisión estimulada. Esto genera otro fotón de la misma frecuencia, viajando en la misma dirección, con la misma polarización y fase como el primer fotón. Esto significa que la emisión estimulada causa ganancia en una onda óptica en la región de inyección, y la ganancia incrementa mientras el número de electrones y huecos aumenta sobre la unión.



**Figura 2.6. Componentes internos de un semiconductor diodo LASER.**

El diodo láser emite luz que es altamente monocromática y muy direccional. Esto significa que la salida del diodo LASER tiene un ancho espectral más estrecho y un ángulo de salida del rayo más pequeño. Un diodo LASER es geoméricamente similar a un ELED. Los diodos LASER son sensibles a la temperatura; incrementos en la temperatura del LASER reducen la potencia significativamente. En muchas aplicaciones la temperatura de los diodos LASERS debe ser controlada.

Los LD tienen características que definen su utilidad en diferentes aplicaciones, entre estas tenemos:

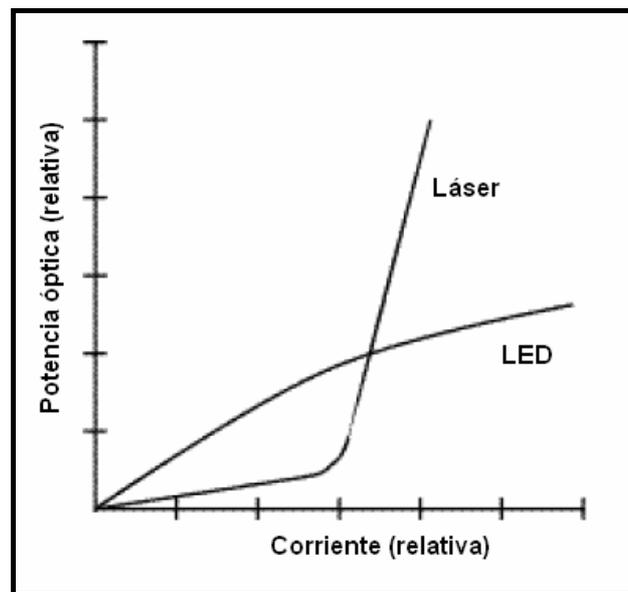
*Longitud de onda pico:* Esta es la longitud de onda en la cual la fuente emite la mayor potencia. Esta debe coincidir con la longitud de onda que posee menos pérdida en la fibra óptica. En los LASERs las mejores longitudes para la transmisión se encuentran de 800 a 885 y de 1300 a 1550 nm.

*Ancho espectral:* Los LASER como los LED no emiten solo una longitud de onda en particular, ellos emiten un rango de longitudes de onda. Idealmente, toda la luz emitida desde un LD debería estar en la longitud de onda pico, pero en práctica la luz emitida se encuentra en un rango de longitudes de onda centradas en la longitud de onda pico. El ancho espectral de un láser es de 0.5 a 0.6 nm.

*Patrón de emisión:* El diagrama polar de irradiación del diodo láser es mucho más angosto que el del diodo LED, lo cual facilita un acoplamiento particularmente efectivo con el conductor de fibra óptica.

*Potencia:* Ambos dispositivos, el LED y el láser, tienen curvas de potencia vs. corriente similares. Sin embargo la

potencia con que responde el láser alcanza un mayor valor que la del LED. Superándolo con un valor aproximado de 100 mW.



**Figura 2.7. Potencia óptica de salida vs. corriente para LED y LD.**

*Velocidad:* Los diodos LASERs tienen un tiempo de subida de alrededor de 1 nanosegundo, en comparación con los LED cuya media típica es de 5 nanosegundos o más, bordean los 2 GHz.

*Tiempo de vida:* El tiempo esperado de operación de estas fuentes emisoras de luz se puede medir en miles de horas de uso. Los LED tienen un tiempo de vida más largo que los LASERs (de 5 a 1). Las condiciones en las que trabajan los LASERs: los aspectos térmicos, la potencia de salida, etc. disminuyen su tiempo efectivo de uso.

#### *Tipos de diodos LASERs.*

Existen dos tipos de estructuras para diodos láser, el Fabry-Perot y el de retroalimentación distribuida. De estos dos tipos de láser, el Fabry-Perot es el más económico, pero generalmente son más sensibles al ruido y de baja velocidad. Los de Retroalimentación Distribuida (DFB) tienen anchos espectrales más angostos, y son usualmente más rápidos.

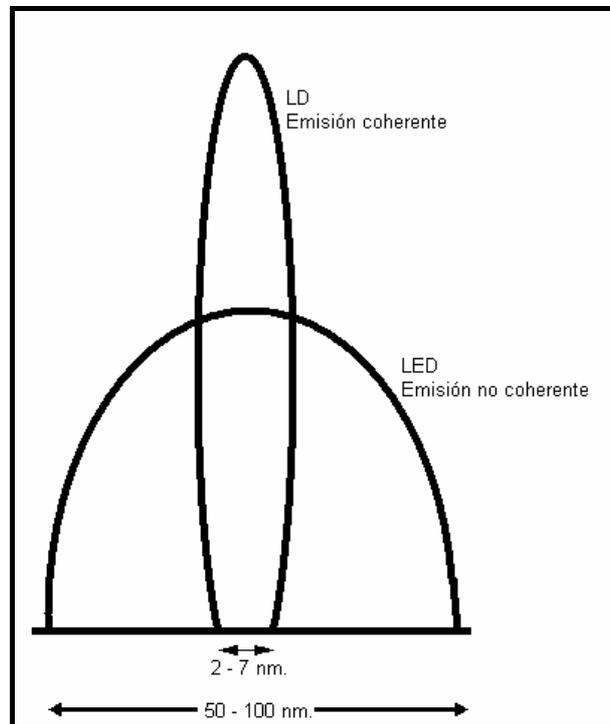
Los LASERs DFB ofrecen el más alto nivel de desempeño, también su costo es más elevado. Son casi monocromáticos. Los LASERs DFB tienden a ser usados para aplicaciones digitales de alta velocidad así también para aplicaciones analógicas por su gran velocidad, bajo

ruido y superior linealidad. Ofrecen también baja corriente de umbral, mayor eficiencia de envolvente y mucha mayor estabilidad ante la temperatura.

Por otro lado, tenemos el láser de emisión de cavidad vertical (VCSEL).

El funcionamiento de los VCSEL se asemeja al de los ELED. La parte principal del VCSEL es una región de ganancia bombeada eléctricamente, también llamada región activa, la cual emite luz. Capas de materiales semiconductores variantes están sobre y abajo de la región de ganancia, creando así espejos. Cada espejo refleja un estrecho rango de longitudes de onda de regreso a la cavidad causando emisión de luz a una sola longitud de onda.

Los VCSEL tienen algunas ventajas: su pequeño tamaño y sus espejos de alta eficiencia que producen una baja corriente de umbral, abajo de 1 mA. La función de transferencia permite estabilidad sobre un amplio rango de temperaturas, algo que es único en un diodo láser.



**Figura 2.8. Patrones de emisión LD y LED.**

## **2.2. FOTODETECTORES.**

En un receptor de comunicaciones ópticas, uno de los elementos mas básicos es el foto-detector. El foto-detector realiza la función opuesta al foto-emisor en un transmisor de comunicaciones ópticas, convierte energía óptica en corriente eléctrica. Los semiconductores foto-detectores son:

- Rápidos
- De bajo costo
- Interconectables con circuitos electrónicos

Una pequeña lista con los materiales mas comunes de foto-detectores se encuentra en la tabla 2.2.

MATERIAL	LONG. DE ONDA
<b>Silicio</b>	400-1050 nm.
<b>Germanio</b>	600-1600 nm.
<b>Arseniuro de Galio</b>	800-100 nm.
<b>Arseniuro de Indio Galio</b>	1000-1700 nm.
<b>Arseniuro de Indio fósforo</b>	1100-1600 nm.

**Tabla 2.2. Materiales de los foto-detectores y sus regiones activas.**

Algunos materiales usados para hacer foto-detectores también pueden ser usados para construir LED y LD.

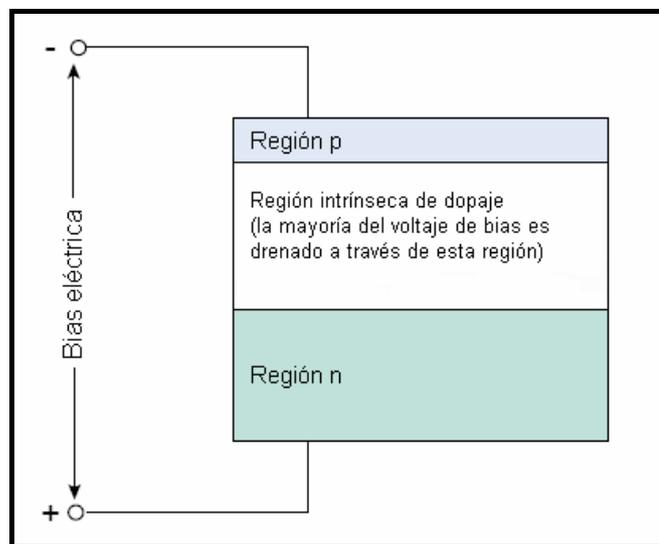
Los sistemas de comunicaciones ópticos, requieren que los detectores ópticos cumplan con ciertas características específicas respecto a su desempeño.

- Ser compatible en tamaño con la fibra óptica de baja pérdida para así permitir un acople eficiente.
- Tener una alta sensibilidad en la longitud de onda en la cual trabaja la fuente óptica.
- Tener el tiempo de respuesta (ancho de banda) que permita manejar la tasa de datos del sistema.
- Que contribuya con la menor cantidad de ruido posible al sistema.
- Que mantenga una operación estable en condiciones ambientales de temperaturas variables.

Existen cuatro tipos básicos de foto-detectores:

- Fotodiodo.
- Fotodiodo de avalancha.
- Fototransistor.
- Foto-Darlington.

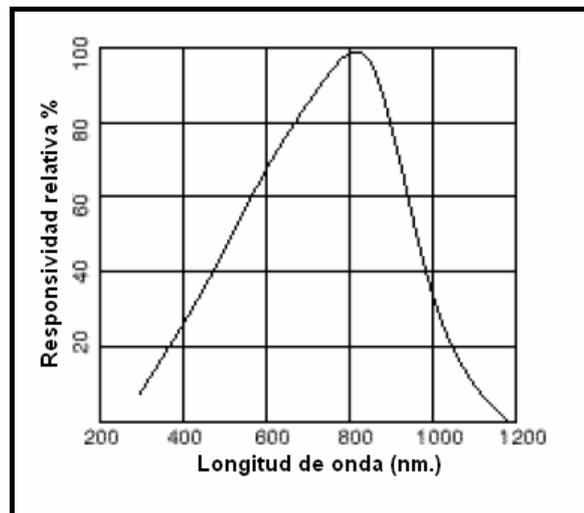
Todos estos fotodetectores producen corriente eléctrica en respuesta a la luz. Los rayos de luz o fotones absorbidos por el material del fotodetector desplazan electrones de los átomos del semiconductor. Estos electrones libres después producen un flujo de corriente eléctrica como si un voltaje de polarización fuera aplicado.



**Figura 2.9. Estructura de un foto-receptor.**

Cada uno de los cuatro foto-detectores tienen sus pros y sus contras referidos en sus parámetros característicos de aplicación dentro de un sistema de fibra óptica, algunos tienen alta velocidad, otros alta ganancia, etc. Los parámetros principales son:

*Respuesta:* La respuesta es una medida de eficiencia. Es una medida entre la corriente de salida del diodo para una potencia determinada. Un buen detector tiene esta eficiencia situada entre el 80 y el 85 % y está dada en amperios/vatios. Por ejemplo la típica respuesta de un fotodiodo PIN es de  $0.6 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ , en comparación con los  $18$  y  $60 \mu\text{A}/\mu\text{W}$  del fototransistor y el fotodiodo de avalancha respectivamente.



**Figura 2.10. Respuesta de un fotodiodo de silicio versus longitud de onda.**

*Corriente de penumbra:* Es la corriente que fluye por el fotodetector en un circuito operativo aunque haya ausencia de luz sobre él. Este valor es generalmente dado por el fabricante y es generado directamente por las condiciones térmicas en la juntura,

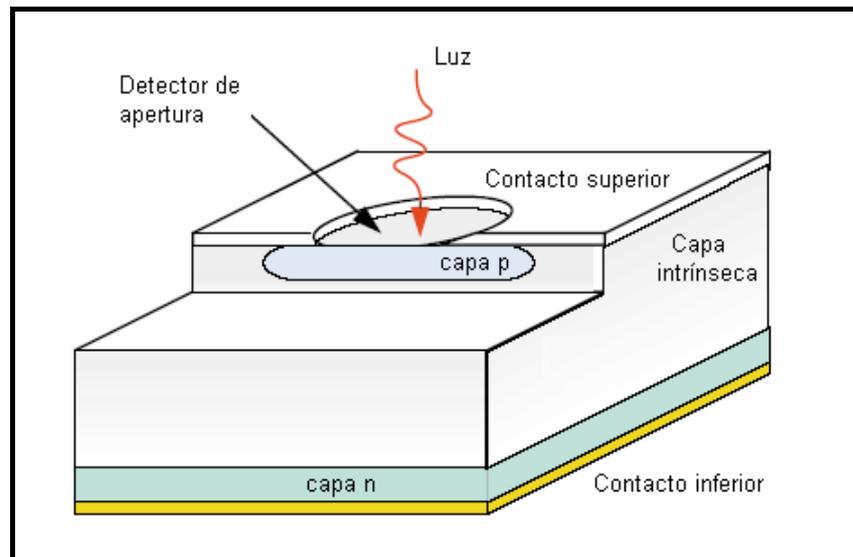
por lo tanto cambia con un aumento de temperatura. Por ejemplo la corriente de penumbra en un fotodiodo PIN o uno de avalancha se duplica cada vez que la temperatura aumenta 10° C.

*Velocidad de respuesta:* Un sistema de fibra óptica depende espacialísimamente del ancho de banda del foto-detector, o lo que es igual, su tiempo de subida y de bajada. Este parámetro también es provisto por los fabricantes del dispositivo, sin embargo, la respuesta del sistema de comunicaciones también depende de los otros elementos que lo conforman. Valores típicos de este parámetro son 1 ns para los fotodiodos PIN y de avalancha, y 2.5 y 40  $\mu$ s para el fototransistor y su variante el darlington respectivamente.

### **2.2.1. Fotodiodo PIN.**

Los fotodiodos son los fotodetectores más comunes y más útiles. Tienen una estructura simple y fácil de fabricar con cualquier material semiconductor. Entre otras ventajas tenemos su rápido tiempo de respuesta, un precio razonable, excelente linealidad, alta fiabilidad y bajos voltajes de polarización.

En el siguiente grafico se aprecia un corte de un fotodiodo.



**Figura 2.11. Corte transversal de un fotodiodo PIN.**

El fotodiodo produce corriente eléctrica absorbiendo la luz que pasa por la apertura del detector. En un fotodiodo un fotón produce solo un electrón y un hueco. Cuando no hay luz incidente en la apertura del detector, una corriente es producida en el fotodiodo. Esta corriente es llamada corriente de oscuridad.

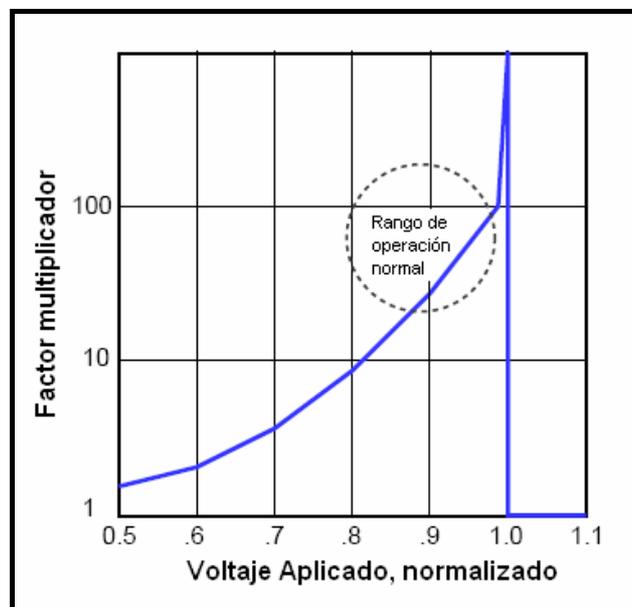
Esta corriente de oscuridad o de penumbra es la corriente de fuga que fluye cuando un voltaje de polarización es aplicado y ninguna luz incide al fotodiodo. La corriente de oscuridad es dependiente de la temperatura. Esta aumenta a medida que la temperatura del dispositivo aumenta.

### **2.2.2. Fotodiodo de Avalancha (APD)**

El fotodiodo de avalancha es el segundo dispositivo mas usado como foto-detector en los sistemas de comunicaciones ópticos. Tiene ciertas analogías con el diodo LASER. En un LASER, unos pocos fotones primarios causan la emisión de algunos fotones. En un fotodiodo de avalancha unos pocos fotones causan algunos electrones y huecos.

El APD opera como un fotodiodo polarizado inversamente sólo que con niveles de voltaje de polarización mucho mayores (entre 100 a 400 voltios). Este voltaje crea un campo eléctrico más potente en la capa de material intrínseco del APD. Como en un fotodiodo, la detección de los fotones de luz empieza primero en la región intrínseca, cuando un fotón de luz es absorbido, creando así una pareja

formada por un electrón y un hueco. Este fuerte campo eléctrico causa que el electrón y el hueco se aceleren uno en contra del otro. Al acelerarse por el campo eléctrico ganan energía, ellos chocan contra átomos estacionarios y desplazan otros electrones y huecos, que a su vez se vuelven a acelerar. Este proceso en el cual se incrementa el número de electrones y huecos se llama avalancha. El proceso de avalancha amplifica el número de portadores generados por un fotón de 10 a 100. En el siguiente grafico se puede apreciar la relación de multiplicación versus voltaje aplicado.



**Figura 2.12. Incremento de corriente con un factor de multiplicación APD versus voltaje aplicado.**

La ganancia de un APD puede ser modificada cambiando el voltaje de polarización que se le esté aplicando. Aplicar un voltaje mayor implicaría una mayor ganancia. Sin embargo demasiado voltaje también incrementa los niveles de ruido.

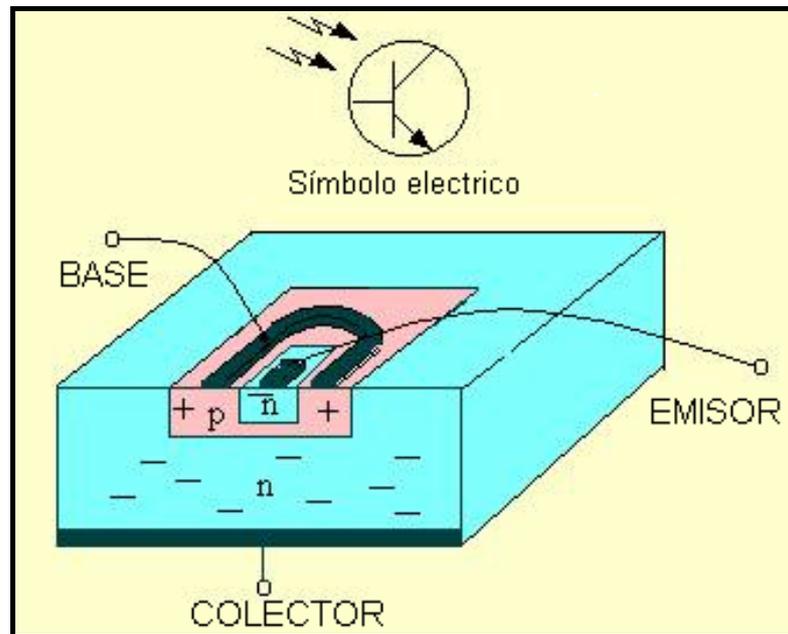
Un APD amplifica la señal opto eléctrica antes de que esta sea posteriormente aumentada por un pre-amplificador. Incrementando la señal antes de que sea inyectada a un amplificador permite que se puedan manejar longitudes de fibra mayores, lo que implica que se puede llegar a cubrir mayores distancias o que se puede usar menos potencia en el transmisor. Por estas razones los APD se usan en diseños donde se necesite cubrir distancias mayores o donde sea requerida alta sensibilidad. Los APD tienen algunas desventajas cuando son comparados con los fotodiodos PIN:

- Tienen variación de ganancia con la temperatura.
- Se requieren altos voltajes y circuitos más complejos.
- Mayor disipación de potencia.
- Altos Costos.

### 2.2.3. Fototransistor.

La relación entrada / salida del fototransistor es más alta que la del fotodiodo, típicamente de 50 a 200  $\mu\text{A}/\mu\text{W}$  con tiempos de subida y tiempos de bajada de aproximadamente 10  $\mu\text{s}$ . Los fototransistores son de bajo costo y fáciles de construir. Sus desventajas son su linealidad marginal, que la ganancia varía con la temperatura y el hecho que solo se usan para aplicaciones de baja frecuencia. Los fototransistores son más comúnmente usados en aplicaciones industriales.

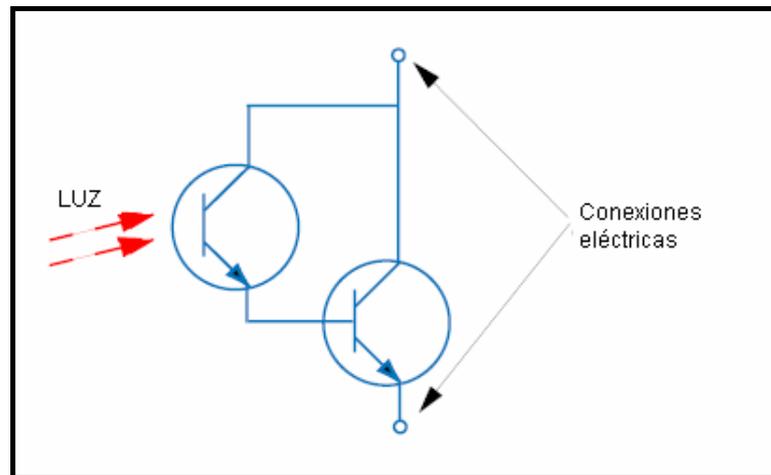
La estructura de un fototransistor es similar a la de un transistor P-N-P excepto que, en vez de tener el área de la base cubierta por metal conductor o por un aislante, tiene un área transparente o abierta por la cual los fotones pueden pasar. Estos fotones son absorbidos en la base y crean el equivalente a la corriente de base en un transistor común. La amplificación de la corriente de la base es típicamente de 50 a 500. Esta amplificación es la razón que aumenta la respuestas o relación potencia entrante potencia saliente.



**Figura 2.13. Corte de un fototransistor.**

#### 2.2.4. Fotodarlington.

El fotodarlington es un fototransistor con otro transistor adicional acoplado, todo en la misma oblea. Este es el diagrama de un fotodarlington.



**Figura 2.14. Esquema eléctrico de un fotodarlington.**

La relación potencia de entrada potencia de salida es 10 veces mayor a la de un fototransistor. Los valores típicos de un fotodarlington están en el rango de los 200 a 800  $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ . Este incremento tiene a cambio la desventaja que los tiempos de subida y bajada se incrementan también. Los fotodarlingtons comparados con los fototransistores tienen costos más elevados, baja linealidad, la ganancia varía más con cada incremento de temperatura y solo se suele usar para sistemas de bajas frecuencias.

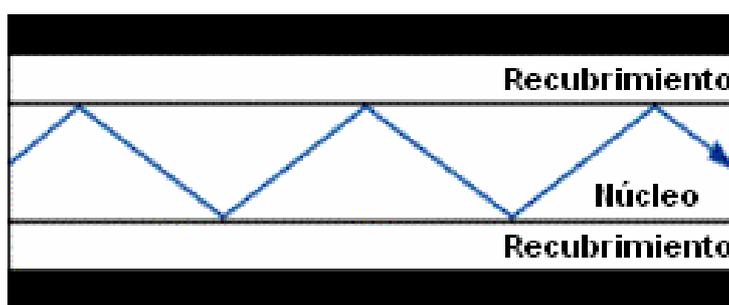
## **2.3. FIBRA OPTICA.**

Sin lugar a duda este es la parte mas importante del sistema, es la estructura fundamental de la comunicación, el medio físico dieléctrico de transmisión por donde viaja la información en forma de rayos de luz o sea en ondas electromagnéticas guiadas. Su comportamiento, su capacidad de transportar información depende de varios aspectos: del material de fabricación, del tipo de su construcción y otras características más que serán tratadas a continuación, las cuales se han visto afectados por muchas mejoras a través del tiempo.

### **2.3.1. Propagación de la luz en el conductor y constitución de la fibra óptica.**

El cable de fibra óptica más simple consiste de dos capas coaxiales de materiales transparentes. La vista de un corte transversal a la fibra óptica se muestra en la figura 2.15. La porción más interna, llamada núcleo, conduce la luz. La capa más externa es llamada recubrimiento. Esta rodea al núcleo y tiene un índice de refracción más bajo. El recubrimiento, al tener un índice de refracción menor al del núcleo, atrapa los rayos de luz debido a la reflexión total interna que ocurre dentro del núcleo de la fibra.

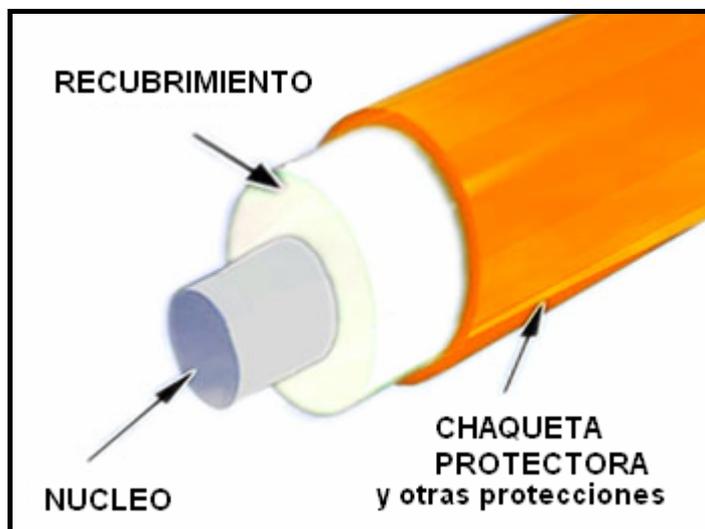
Los rayos de luz viajan a lo largo del núcleo en línea recta hasta chocar con la frontera núcleo-recubrimiento. Al producirse el choque, el rayo rebota en la frontera y toma un nuevo recorrido en línea recta hasta encontrarse con otra frontera. De esta manera, los rayos viajan en el interior del núcleo de la fibra, ajustando su recorrido gradualmente con las constantes reflexiones que ocurren, tantas veces como sean necesarias hasta finalmente salir del interior del núcleo al llegar al extremo de la fibra. Es por esto que el recubrimiento es por lo general opaco, de tal forma que disipe la luz que alcanzara a llegarle. Si los rayos llegaran a viajar por el recubrimiento, el ancho de banda de la fibra se vería severamente afectado.



**Figura 2.15. Viaje de un rayo en un conductor óptico.**

En la figura 2.16 se muestra el arreglo coaxial del núcleo, el revestimiento y otros elementos de un cable comercial de fibra.

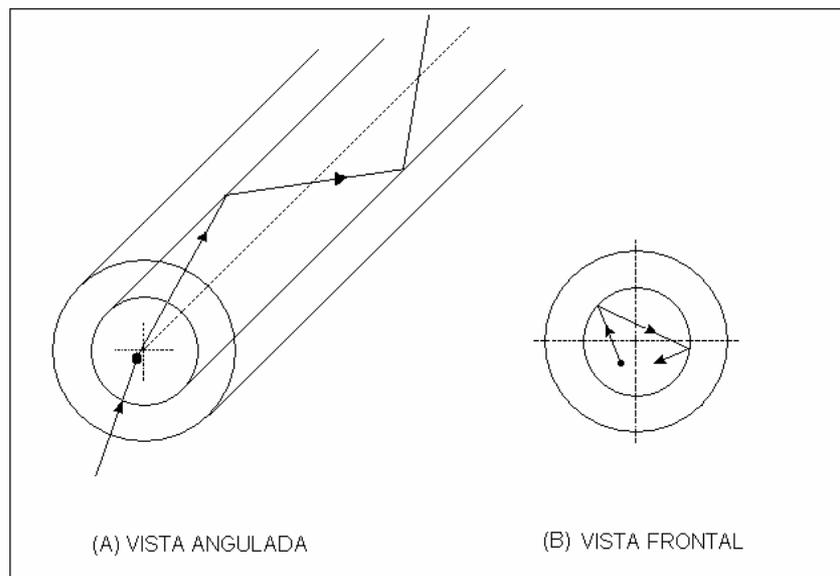
Como se puede ver, existen otros elementos que complementan al diseño básico de una fibra. No todos los cables poseen las partes que se muestran en el gráfico. Por ejemplo, los cables submarinos poseen múltiples núcleos y revestimientos además de capas para protección y refuerzo, no mostrados en la Figura 2.16.



**Figura 2.16. Corte transversal de un cable de fibra óptica.**

Sin embargo, existe un punto a tomarse en cuenta. En todo el análisis anterior de propagación de la luz dentro de la fibra se asumió que los rayos de luz entraban al cable y a lo largo de su propagación dentro de él siempre pasaban a través del eje central de la fibra. Dichos rayos son llamados “rayos meridionales”. Pero es posible que algunos rayos nunca crucen este eje meridional, y estos rayos son llamados “sesgados”.

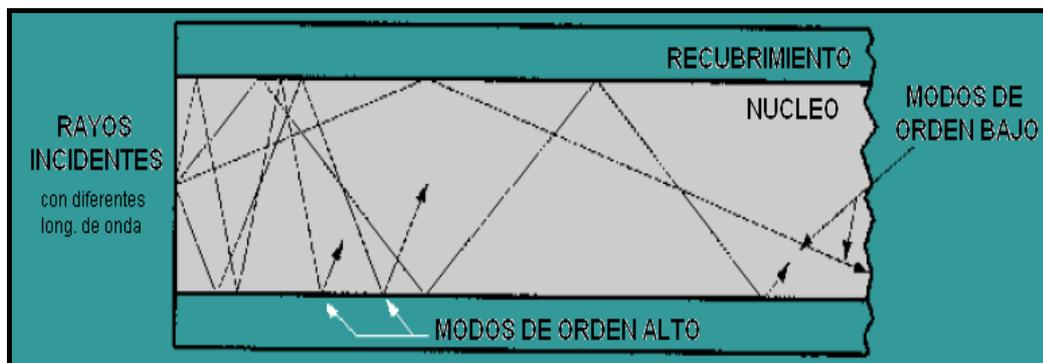
Un ejemplo es mostrado en la figura 2.17.



**Figura 2.17. Propagación de los rayos sesgados.**

Como se observa en la figura 2.17 la luz entra en el conductor de fibra óptica con diferentes longitudes de onda (ancho espectral), siendo las longitudes de orden mas bajo las que viajan en forma paralela al eje de la fibra, el de orden medio rodea varias veces la interfase y los modos de orden alto son aquellos que tienen un ángulo de reflexión muy pequeño. Un rayo con modo de orden alto da varios saltos en la fibra, resultando en una trayectoria extremadamente grande.

Estos rayos de orden alto son aquellos que ingresan a la fibra con ángulo cercano al crítico y dan muchos rebotes a lo largo del recorrido; su trayectoria puede ser considerablemente más larga que la de los rayos con ángulos superficiales. Consecuentemente, nunca podrán ser recobrados en el terminal de la salida para largas longitudes de fibra. Pero, para cortas y medias distancias pueden no perderse.



**Figura 2.18. Modos de propagación de orden alto y bajo.**

Dado que el diámetro del núcleo de un conductor de fibra óptica se halla típicamente entre los 10 y 1000  $\mu\text{m}$ . O sea que es solamente un poco mayor que la longitud de onda de la luz transmitida por ese núcleo (aprox.  $1\mu\text{m}$ .) es necesario considerar los fenómenos de la óptica ondulatoria.

Una manifestación típica de interferencia de dos ondas se obtiene únicamente cuando ambas tienen la misma longitud de onda y existe una diferencia constante entre ambas en el tiempo. Este tipo de ondas se llaman coherentes. Por ello para la transmisión de luz con conductores de fibras ópticas es necesario encontrar fuentes luminosas coherentes o las que emiten luz lo más coherentemente posible. Estos modos de propagación se pueden determinar

matemáticamente con mayor exactitud aplicando las Ecuaciones de Maxwell.<sup>1</sup>

Este sistema de ecuaciones para ondas electromagnéticas se puede simplificar considerablemente si para los conductores de fibra óptica se consideran únicamente las ondas débilmente guiadas (ondas de orden bajo), cuyas intensidades de campo son despreciables en la dirección de dicho eje, como se dijo en párrafos anteriores. Sin embargo, todos estos problemas se pueden presentar como una mezcla de longitudes de ondas de orden medio-bajo, las mismas que darán como resultado un problema de dispersión.

#### **2.3.1.1. Tipos o modos de la fibra.**

El “modo” es un concepto abstracto creado por los matemáticos que le permite a los físicos describir una experiencia relacionada con la teoría electromagnética.

---

<sup>1</sup> Una muy buena explicación matemática se encuentra en el siguiente libro: Martín Pereda, José: Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones, PEARSON EDUCACIÓN, 2004.

La teoría de los modos puede ser aplicada a las ecuaciones de Maxwell al tratar aspectos inherentes a la energía electromagnética. Las ecuaciones de Maxwell indican: Las condiciones límites de una guía de onda electromagnética determinan las características del paso de la luz. Como estas varían según las condiciones que se presenten, incluyendo aquellas inherentes a los cables de fibra óptica, existen varias soluciones simultáneas a las ecuaciones de Maxwell. Cada solución es diferente, y cada solución es llamada un modo.

Un modo viajando en un cable de fibra tiene una trayectoria finita y una energía característica definida por las ecuaciones de Maxwell. Las fibras ópticas pueden manejar desde un modo hasta más de 100.000 modos. Como ya se dijo, los modos de orden bajo viajan cerca del centro del núcleo y los modos de órdenes más alto viajarán cercanos al ángulo crítico.

Los tipos de fibra son referidos según al diseño de fabricación que posee el núcleo de la misma, el cual define el trayecto que sigue la luz al cruzar su interior. Los dos tipos de fibra son la mono-modo y la multi-modo, esta última se subdivide en: índice escalonado e índice gradual.

*Fibra multi-modo:*

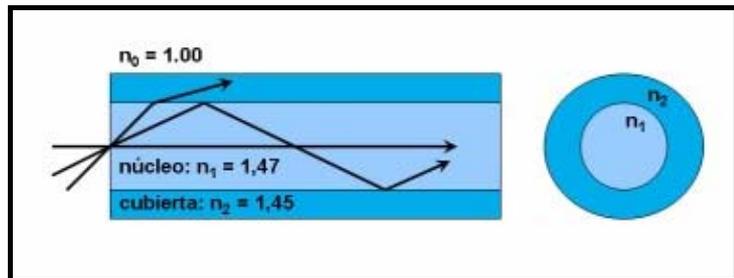
Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un modo de luz. Para una fibra multi-modo el número de modos que existen realmente depende de otras características de la fibra y se puede reducir durante la propagación.

Existen dos tipos de fibra multi-modo: la fibra de índice escalón y la fibra de índice gradual. Difieren en los perfiles del índice de refracción de su núcleo y recubrimiento.

*Fibra de índice escalón*

Una fibra de índice escalón (step-index) es una fibra óptica con diferentes índices de refracción del

núcleo y recubrimiento, pero uniformes. En la frontera núcleo-recubrimiento hay un cambio abrupto en el índice de refracción, de ahí obtiene su nombre. Una fibra de índice escalón se muestra en la figura 2.19. El diámetro de este tipo de fibra varía desde  $50\ \mu\text{m}$  a  $1,3\ \text{cm}$ . Adolece de tener un ancho de banda bastante bajo y existen bastantes pérdidas. La dispersión más baja es de  $15\ \text{ns} / \text{Km}$ .



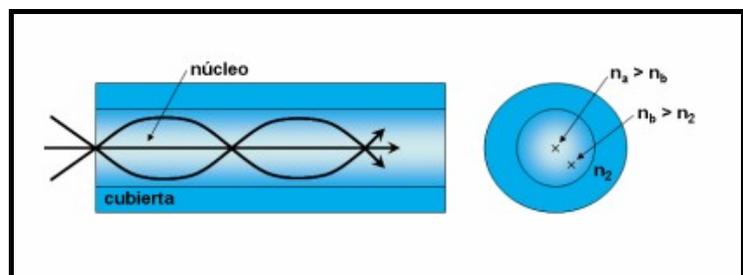
**Figura 2.19. Fibra óptica de índice escalón.**

*Fibra de índice gradual.*

El índice de refracción del núcleo de una fibra de índice gradual (graded-index) decrece desde el centro hasta el exterior. El índice de refracción del recubrimiento es uniforme. La fibra de índice

gradual curva los rayos de luz en caminos sinuosos, debido a que el índice de refracción del núcleo no es uniforme. La región exterior del núcleo tiene un índice de refracción más bajo que el centro. Debido a esto la velocidad de los rayos de luz crece conforme los rayos se alejen del centro, de esta manera se puede lograr que los rayos de modos altos lleguen al mismo tiempo que los rayos de modos bajos en el otro extremo de la fibra óptica.

En una fibra de índice gradual, los modos de orden alto recorren mayores distancias que los modos de orden bajo. La dispersión modal en este tipo de fibra es de 1 ns / Km.



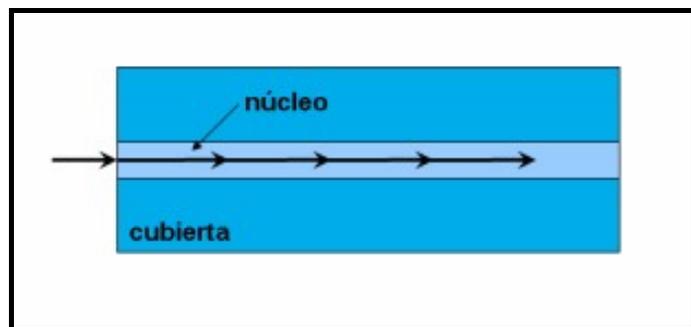
**Figura 2.20. Fibra óptica de índice gradual.**

### Fibra mono-modo.

La construcción de esta fibra sólo permite únicamente el paso de un modo de luz. El núcleo es bien pequeño, sólo 5 o 10  $\mu\text{m}$  de diámetro. Una fibra mono-modo es mostrada en la figura 2.21. Las fibras mono-modo tienen una menor pérdida de señal y un ancho de banda potencial por encima de 100 GHz/km. Las fibras mono-modos son capaces de transferir grandes cantidades de datos debido a su bajo índice de dispersión.

Para que una fibra sea mono-modo, el diámetro del núcleo debe ser aproximadamente igual a la longitud de onda de la portadora óptica. El recubrimiento de una fibra óptica debe ser de un grosor de 10 veces más que el núcleo para satisfacer las condiciones límites de las ecuaciones de Maxwell.

Una fibra óptica mono-modo a 1300 nm no va a seguir siendo mono-modo con una fuente óptica a 820 nm. Las más comúnmente disponibles comercialmente son las fibras usadas en sistemas a 1300 y 1500 nm.



**Figura 2.21. Fibra óptica mono-modo.**

#### **2.3.1.2. Materiales de la fibra.**

Los materiales usados para la construcción de las fibras ópticas son cuidadosamente seleccionados. El núcleo y el recubrimiento deben ir dispuestos juntos de tal manera que se cree una superficie reflectiva; de esta manera, los rayos de luz confinados en el núcleo logren viajar a través de él. Dado que el núcleo y el recubrimiento siempre

deben tener diferentes índices de refracción, los materiales que los constituyen no pueden ser los mismos.

Los dos materiales más usados para la fabricación de la fibra óptica son el vidrio y el plástico. El vidrio tiene propiedades ópticas superiores, pero por lo general, son más caras que las plásticas. La fibra de vidrio es usada para altas velocidades en transmisión de datos y largas distancias de transmisión. Para bajas velocidades de transmisión y distancias cortas, la fibra plástica es más económica debido a su mayor diámetro de núcleo y económicos costos de instalación y fabricación.

Como se mencionó, la atenuación en una fibra óptica es muy dependiente del material usado como núcleo y de la longitud de onda de la luz que viaja en el interior de la fibra.

Observe que a determinadas longitudes de onda se tiene menos atenuación, lo cual puede usarse para tener mejores calidades de transmisión. La selección de la mejor longitud de onda para una fibra, además depende de las fuentes lumínicas y detectores disponibles.

### **2.3.2. Parámetros de medición/transmisión en la fibra óptica.**

La transmisión de luz a lo largo de la fibra óptica es muy eficiente, mas sin embargo cierta luz se pierde. La pérdida de luz durante la transmisión se debe a algunos factores que deben ser vigilados y medidos con carácter importantísimo y son los siguientes:

- Atenuación debido a la distancia, factores propios de construcción de la fibra y la longitud de onda a la que se transmite.
- Absorción de los materiales extras que se colocan en el interior de la fibra.
- Dispersión de la luz fuera del núcleo de la fibra.
- Daños por agentes externos.

### **2.3.2.1. Atenuación.**

La transmisión de la luz por fibra óptica no es 100% eficiente. Existe luz (energía) que se pierde en la transmisión y a esto se le llama atenuación. Varios mecanismos influyen: absorción por materiales dentro de la fibra, dispersión de la luz fuera del núcleo de la fibra, y fuga de luz fuera del núcleo causada por factores ambientales. La atenuación depende entre otros factores de la longitud de onda de la luz acoplada. Por eso, para determinar las gamas de longitudes de onda adecuadas para la transmisión óptica con baja atenuación, resulta, en general, útil medir la atenuación de un conductor de fibra óptica en función de la longitud de onda (espectral).

La atenuación se la mide comparando la potencia de salida con la potencia de entrada. La atenuación de una fibra se la mide en decibeles (dB). El decibel es una unidad logarítmica que relaciona la relación de potencias de salida y entrada de la señal que viaja.

Así, si la potencia de salida es de 0,001 la potencia de entrada, la señal ha experimentado una pérdida de 30 dB. El signo menos ha sido suprimido por conveniencia pero implica que ha existido una atenuación en la señal.

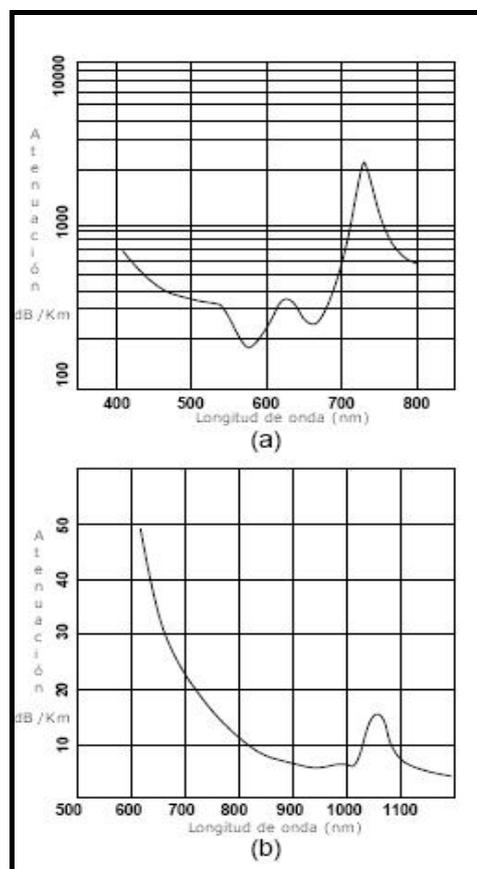
Todas las fibras ópticas tienen una atenuación característica en decibeles por unidad de longitud, normalmente en decibeles por kilómetro. La atenuación total en la fibra, en decibeles, es igual a la atenuación característica de la fibra multiplicada por la longitud del cable.

Si se observa la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica en el estado estacionario, se verificara que la potencia luminosa  $P$  conducida, decrece en forma exponencial con la longitud  $l$  del conductor.

$$P_l = P_o \cdot e^{-\alpha l}$$

(2.1.)

En esta fórmula,  $P_o$  es la potencia luminosa que se acopla al comienzo del conductor de fibra óptica,  $P_l$  la potencia luminosa aun existente en el conductor al cabo de una distancia  $l$  y  $\alpha$  es el coeficiente con el cual se da la atenuación por unidad de longitud.



**Figura 2.22. Atenuación para fibra óptica (a) de plástico (b) de vidrio.**

La atenuación en un conductor de fibra óptica es un parámetro importante para la planificación de redes de cables para telecomunicaciones ópticas, es por eso necesario vigilarla y mantener estas pérdidas en el mínimo posible.

La forma de medición de atenuación en un cable óptico, se conoce como método de corte, y se determina la potencia luminosa en dos puntos distintos  $L_1$  y  $L_2$  del conductor de fibra óptica. Cuando se realiza la medición se mide primero la potencia lumínica  $P_2$  en el extremo  $L_2$  y luego  $P_1$  en  $L_1$ . Cabe resaltar que para la medición de  $L_1$  se debe realizar un corte en el conductor sin afectar las condiciones de acoplamiento entre la fuente emisora y el conductor de fibra óptica. El coeficiente de atenuación  $\alpha$  para el conductor óptico se obtiene con la expresión:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{L_2 - L_1}$$

(2.2.)

Este método es del tipo destructivo, ya que es necesario seccionar un corto tramo del conductor, lo cual no tiene sentido por ejemplo en cables preconfeccionados. En estos casos son más convenientes otros métodos como el de inserción, donde se le acopla otro tramo al tramo por medir o a su vez utilizar las herramientas existentes como medidores de potencia óptica (OPM). Pero para fines didácticos este método ilustra de manera sencilla el efecto de la atenuación en la fibra debido a la distancia de recorrido.

#### **2.3.2.2. Ancho de banda.**

Este es el segundo parámetro de mayor importancia junto con la atenuación en un conductor de fibra óptica. Mientras que la atenuación se describe como las pérdidas de luz que se producen a lo largo del conductor de fibra óptica, el ancho de banda (bandwidth, BW o bien el producto de longitud y ancho de banda) constituye una medida de su comportamiento dispersivo.

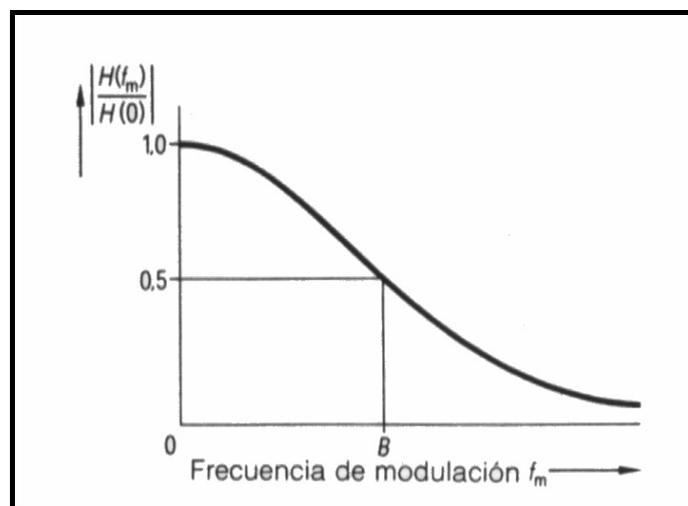
Como se verá posteriormente un pulso que se propaga a lo largo del conductor incrementa su duración a causa de la dispersión. Si este efecto se lo traslada al campo de las frecuencias, el conductor de fibra se comporta como un filtro pasa bajos.

Por lo anterior se entiende el hecho que en un conductor de fibra óptica a medida que aumenta la frecuencia de transmisión  $f$  decrece la amplitud de la onda luminosa hasta quedar completamente anulada. El conductor deja pues pasar señales con bajas frecuencias y atenúa aquellas a medida que aumentan estas. Si por cada frecuencia de transmisión se miden amplitudes de potencia luminosa al comienzo  $P_1(f)$  y al final del conductor  $P_2(f)$ , se obtiene al establecer la relación de ambas amplitudes el valor de la función de transferencia  $H(f)$ .

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

(2.3.)

$H(f)$  es una función de la frecuencia de transmisión. Habitualmente se normaliza el valor de la función de transferencia dividiéndolo para  $H(0)$ . En este caso  $H(0)$  es la función de transferencia correspondiente a la frecuencia de 0 Hz.



**Figura 2.23. Curva del filtro pasabajos de Gauss.**

El desarrollo de la curva acampanada corresponde aproximadamente a la de un filtro pasabajos de Gauss.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Este tipo de filtro puede ser descrito mas a fondo en el libro: Oppenheim, Alan V., Willsky, Alan S.: Signals and Systems, New Jersey: Prentice Hall. 1997.

La frecuencia a la cual el valor normalizado de la función de transferencia es igual a 0.5 se denomina ancho de banda del conductor de fibra óptica.

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

La medición de este parámetro tan importante se puede realizar mediante dos métodos:

- la medición en el ámbito de la frecuencia.
- la medición en el ámbito del tiempo.

Por la definición de transferencia, la medición en el mundo de la frecuencia o método de la Wobulación<sup>1</sup> se basa en medir la potencia óptica que llega al extremo receptor del conductor habiéndose

---

<sup>1</sup> Una explicación mas detallada se encuentra en el libro: Gössing, P, Gübther, M, Conductores de fibra óptica (Lichtwellenleiterkabel), Siemens Aktiengesellschaft, 1987, Pág. 63.

inyectado en su principio, por medio de un transmisor, una potencia lumínica digital de preferencia (o análoga modulada) con una frecuencia  $f$  que se incrementará continuamente. Con los resultados de estas mediciones y utilizando las expresiones anteriores, se calcula el valor de la función de transferencia y el ancho de banda. Manteniendo constante la potencia óptica en el transmisor a una frecuencia  $f$ , se podrá leer directamente el valor de ancho de banda de la fibra óptica, expresado como la frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica  $P_2(f)$  en el receptor se reduce a un valor igual a la mitad de la potencia de entrada  $P_1(f)$  (puntos de media potencia). Este será el método más didáctico, ya que es muy apto para la medición de ancho de banda en poco tiempo y con un reducido equipamiento.

Sin embargo, también existe la medición en el ámbito del tiempo, donde se analizan ensanchamientos de los pulsos ocasionados por los efectos de la dispersión. El pulso de salida

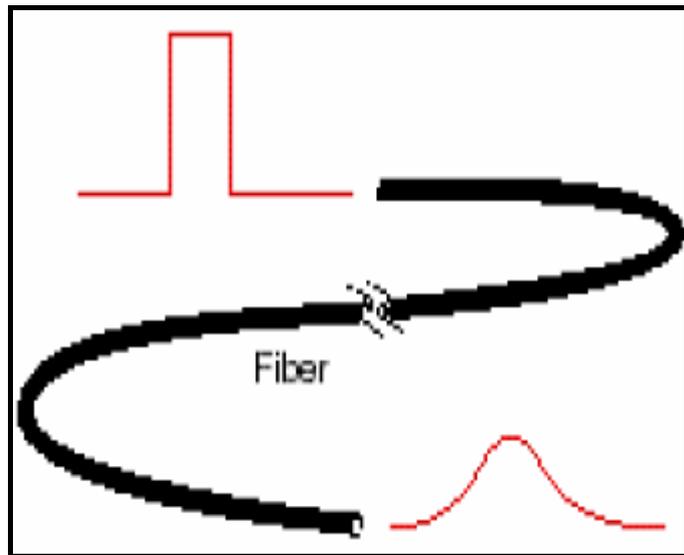
resultante sobre el fotodiodo se lo amplifica y se lo analiza con un osciloscopio de muestreo donde por un cálculo de integración de los pulsos se calcula el ensanchamiento efectivo del pulso.

#### **2.3.2.3. Dispersión.**

La dispersión es la distorsión de la señal debido a que algunos modos requieren más tiempo de viaje en el interior de la fibra que otros y como se vio anteriormente afecta y está muy ligado a parámetros como el ancho de banda y la atenuación de la fibra. En un sistema de modulación digital, esto causa el ensanchamiento del pulso en el tiempo. No se pierde potencia por dispersión pero los valores picos de intensidad se reducen como se muestra en la figura 2.24. La dispersión distorsiona tanto a señales análogas como las digitales. La dispersión es normalmente especificada en nanosegundos por kilómetros.

Existen dos tipos de dispersión:

- Dispersión intramodal o cromática y,
- Dispersión intermodal o modal.



**Figura 2.24. Dispersión en fibra óptica.**

#### Dispersión cromática.

Esta dispersión ocurre asociada al hecho de que las fuentes ópticas no son monocromáticas, ocurren en cualquier tipo de fibras y depende principalmente de los materiales de la fibra y por ende de la longitud de onda alrededor de la cual está centrado el espectro. Existen dos tipos de dispersión

intramodal: dispersión en el material y dispersión en las guías de onda.

*Dispersión en el material.*

La dispersión en el material da una medida de variación del índice de refracción de grupo para diferentes longitudes de onda y se calcula derivando a dicho índice los tiempos de recorrido.

La dispersión en el material es una magnitud que depende de la sustancia y puede ser modificada, variando el dopado del núcleo de la fibra, dentro de determinados límites. Esta dispersión afecta tanto a fibras mono-modo como multi-modo.

*Dispersión en la guía de ondas.*

Este efecto dispersivo es muy importante para los conductores de fibra óptica mono-modo. Se origina en virtud de la dependencia de la longitud de onda respecto de la distribución luminosa del modo fundamental entre el núcleo y el recubrimiento y, por tanto, de la diferencia de índices de refracción.

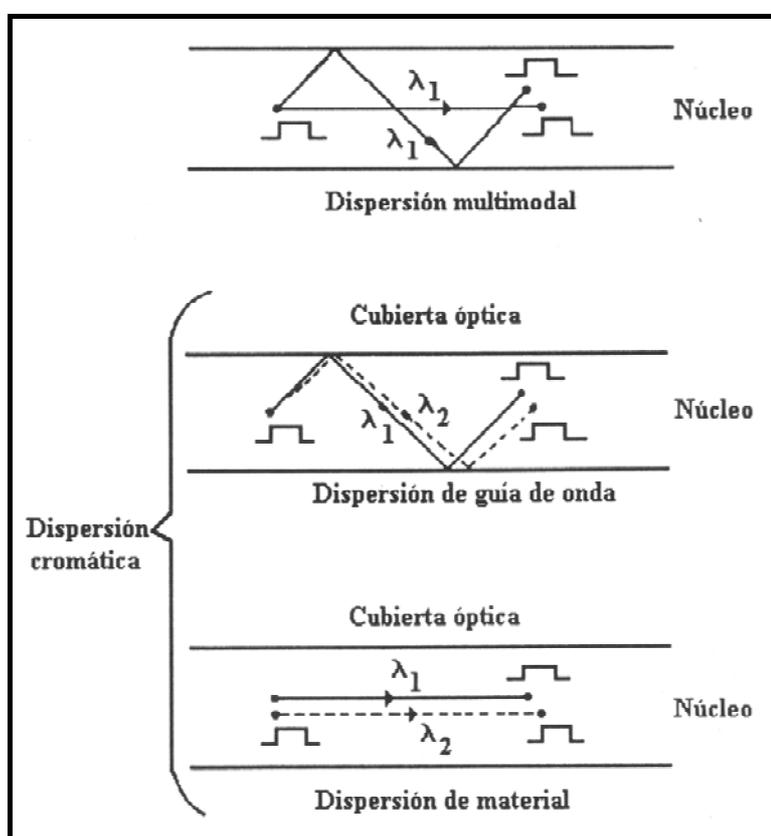
Cuanto mayor son las longitudes de onda  $\lambda$  tanto más se incrementa la penetración desde el núcleo al recubrimiento del modo fundamental.

### Dispersión modal.

La dispersión modal, también conocida como dispersión multi-modo, afecta sólo a la fibra multi-modo y está causada por los diferentes caminos o modos que sigue un rayo de luz en la fibra. Los diferentes modos viajan de un extremo a otro con la misma velocidad pero llegan al extremo opuesto en diferentes tiempos, ya que viajan diferentes distancias. Esto da como resultado que los rayos recorran distancias diferentes y lleguen al otro extremo de la fibra en tiempos diferentes. Un pulso transmitido se ensanchará debido a este efecto y reducirá en consecuencia la máxima velocidad de transmisión efectiva de datos.

Una fibra de índice escalón tiene la dispersión modal más alta y por tanto el ancho de banda más bajo. Debido al perfil no uniforme del índice de

refracción de una fibra de índice gradual, la dispersión modal decrece. Esto redundaría en una transmisión de datos mayor que con una fibra de índice escalón. La dispersión multi-modal está dada principalmente función de la longitud de la fibra.



**Figura 2.25. Ilustración de diferentes tipos de dispersión.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Del libro: Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas de Jardón, H, Linares y Miranda , R, Pág. 39.

#### **2.3.2.4. Pérdidas por dobleces.**

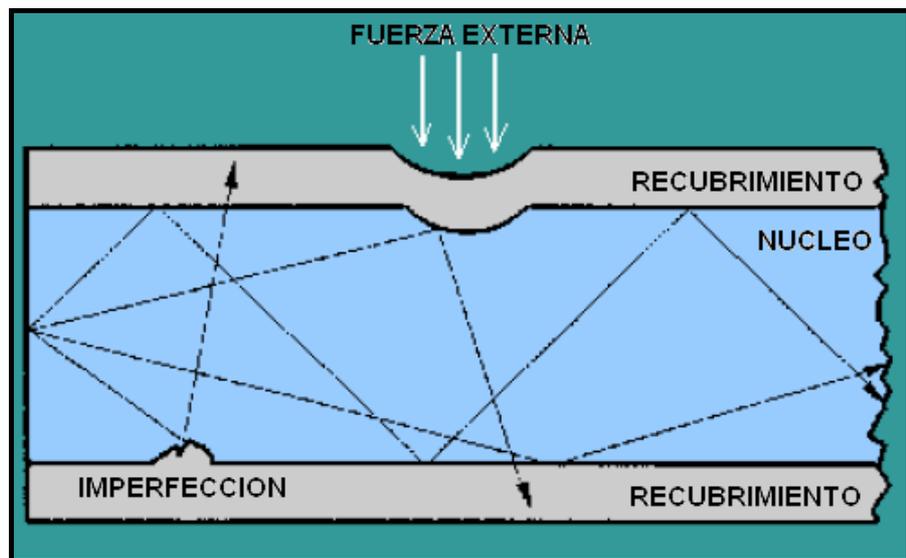
Los dobleces en cableado de la fibra también causan serias atenuaciones. Las pérdidas por dobleces están clasificadas de acuerdo al radio de curvatura: pérdidas por micro y macro dobleces.

##### *Pérdidas por micro dobleces.*

Estas son pérdidas causadas por dobleces, discontinuidades o pequeñas imperfecciones microscópicas en el interior de la fibra, que ocurren principalmente al cablear la fibra si estas son dobladas muy agudamente. También fuerzas externas pueden ser causas de pérdidas por dobleces micro. Una fuerza exterior puede aparentar no dañar la protección externa del conductor óptico pero causa micro dobleces al interior de la fibra.

Estos dobleces microscópicos que sufre la fibra cambian las trayectorias de los rayos de luz o sus modos de propagación dentro de ella, como se muestra en la figura 2.26. El resultado de este tipo

de pérdidas es una contribución a la atenuación, ya que los micro dobleces convierten los rayos de orden bajo en modos de orden alto los cuales generalmente se pierden en la transmisión.



**Figura 2.26. Pérdidas por micro dobleces.**

#### *Pérdidas por macro dobleces.*

Son aquellas pérdidas causadas por dobleces con curvaturas más grandes comparadas con el diámetro de la fibra.

Estas pérdidas se convierten en una gran fuente pérdida cuando los dobleces se encuentran en el orden de unos pocos centímetros. La propagación de la luz en la parte interna del doblez viaja una distancia más corta que a la salida del doblez. Por lo tanto para mantener la fase de la onda de la luz, la velocidad de fase del modo debe incrementarse. Cuando el doblez de la fibra es menor que radio crítico permitido la velocidad de fase debe ser incrementada a un valor mayor al de la velocidad de la luz. Sin embargo y como se sabe esto es imposible. Esta situación causa que una parte de los rayos de orden bajo sean convertidos en modos orden alto. Estos modos de orden alto serán por ende pérdidas o radiación que se escapa de la fibra.

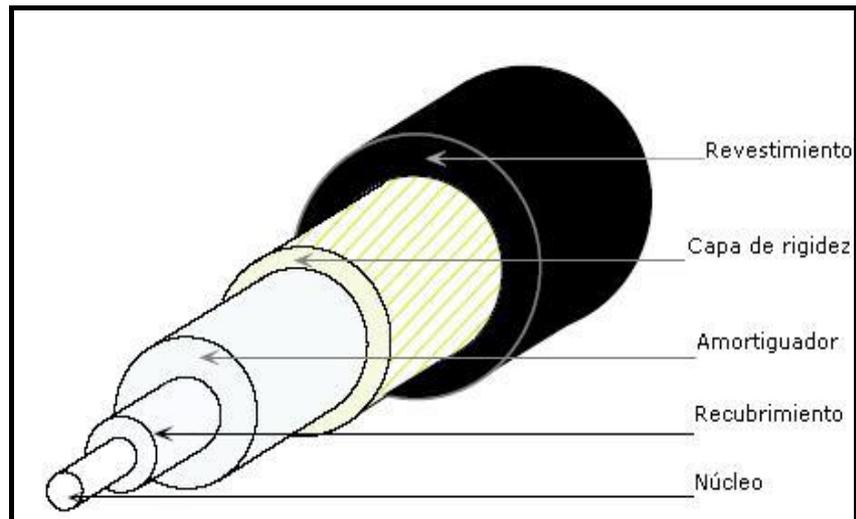
La sensibilidad a las pérdidas por dobleces puede ser reducida incrementando el índice de refracción del núcleo o el diámetro del mismo.

### **2.3.2.5. Cableado.**

La mayoría de las fibras ópticas son empacadas antes de su uso. De no ser así, cualquier daño al revestimiento causa degradación en la guía de onda óptica. El cable, la parte más externa de la estructura de protección de una o más fibras ópticas, protege al recubrimiento y al núcleo del medio ambiente y de males mecánicos o degradaciones. Los cables de fibra óptica vienen en una amplia variedad de configuraciones. Consideraciones importantes al seleccionar un cable son:

- Resistencia de tensionado.
- Libre de rugosidad.
- Resistencia ambiental.
- Durabilidad.
- Flexibilidad.
- Tamaño.
- Peso.

La evaluación de estas consideraciones depende de la aplicación. La estructura de un cable de fibra óptica se muestra en la figura 2.27.



**Figura 2.27. Corte de una fibra óptica.**

*Amortiguador:* Una capa alrededor del recubrimiento para protegerlo del daños. Además sirve como parte del refuerzo para cargas del cable de fibra.

*Capa de rigidez:* Consta de un material que es añadido para incrementar la fuerza de tensión.

Entre los materiales usados están: acero, hebras de fibra de vidrio o cañas.

*Revestimiento:* La parte más externa del cable el cual provee de protección contra fricciones, ácidos, aceites, agua, etc. El tipo de revestimiento a escoger depende de la necesidad requerida.

### **2.3.3. Fibra óptica plástica como nueva tendencia tecnológica.**

Cuando las personas escuchan hablar de fibra óptica, ellos inmediatamente la relacionan con la fibra óptica de vidrio. Pocas personas, incluidos profesionales del medio, conocen acerca de la fibra óptica de plástico (POF) que precede a la hecha de vidrio. Debido a que la fibra de vidrio tiene ciertas ventajas, esta ha dominado el mercado, mientras la POF se ha mantenido al margen a lo largo del tiempo.

Pero recientes desarrollos tanto en tecnología como en aplicaciones han mejorado la imagen de la POF, y estos

desarrollos han hecho un espacio para este medio de transmisión en el mundo entero.<sup>1</sup>

#### **2.3.3.1. Reseña histórica.**

Debido a las dificultades que presentaba la fibra óptica de vidrio con sus terminaciones, empalmes, herramientas, etc., los investigadores empezaron a buscar nuevas maneras de hacer más fáciles estas instalaciones. Y una de las primeras ideas fue la de usar plástico claro o semi-transparente en lugar de vidrio. Motorola desarrolló la fibra plástica en 1980, pero no se esforzó mucho en el marketing de ésta.<sup>2</sup> La primera generación de POF transfería la luz correctamente, pero su atenuación era muy alta, y tan solo un pequeño tramo podía ser usado. Consecuentemente, esto frenó su producción de inmediato.

---

<sup>1</sup> Plastic Optical Fiber Trade Organization, Present State-of-the-art of Plastic Optical Fiber (POF) Components and Systems, White Paper, 2004.

<sup>2</sup> POF: Fiber Without the Pain, Aug 1, 1998 12:00 PM, Paul Rosenberg, Consulting Editor, EC&M.

En los últimos años, muchas compañías manufactureras de fibra (especialmente japonesas) trabajaron en un nuevo tipo de fibra de plástico con menor atenuación. Dos grandes desarrollos fueron el resultado de estas investigaciones: fibra plástica de índice gradual y la POF de baja AN.

La POF de índice gradual contiene varias capas de plástico, cada una con un índice de refracción menor (el plástico mas denso en el centro, y las capas de plástico menos denso conforme se acerca a la superficie de la fibra). Debido que la luz viaja más rápido a través de las capas menos densas, los rayos de luz se refractan hacia el exterior de la fibra alineándose con aquellos que viajan en el centro de la fibra. El resultado: una mayor capacidad para una velocidad de transmisión más rápida a una distancia mayor.

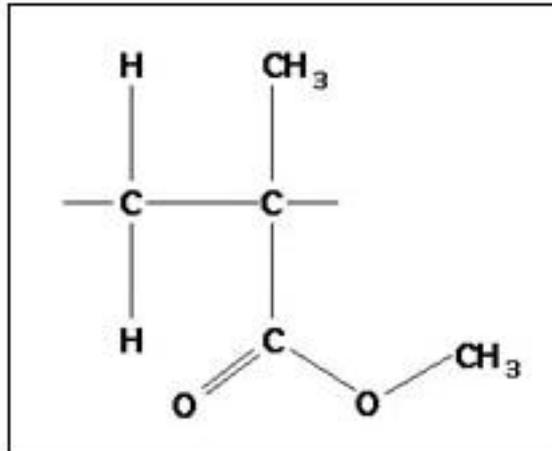
### **2.3.3.2. Generalidades de su fabricación.**

Existen varios materiales y varios procesos para la fabricación de la fibra óptica plástica. Cada uno con diferentes características y acoplados al uso que se va a dar al cable óptico a fabricar.

Los materiales usados en la fabricación son principalmente dos, los cuales subdividen las clases de fibra plástica en:

*Resina de PMMA o Fibra óptica de plexiglás o RAYON.*

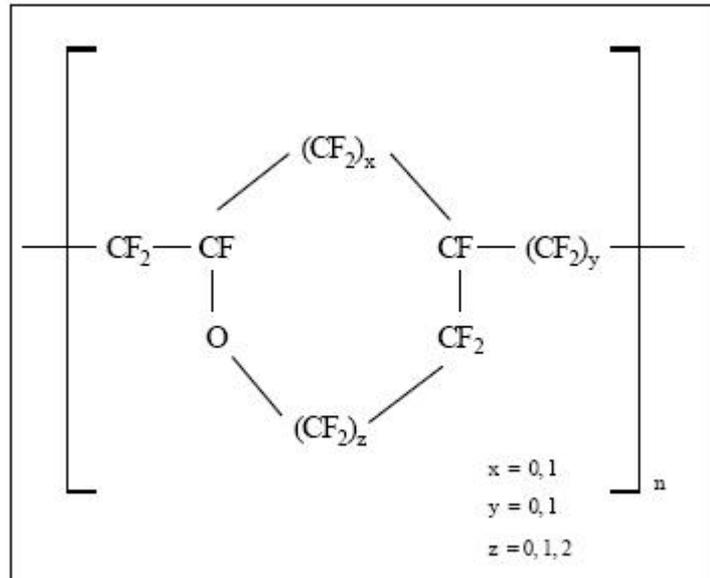
- Cuya material base es el CH (Carbono-Hidrógeno).
- Posee una atenuación aproximada de 130 dB/Km.
- Opera preferiblemente en la ventana de los 650 nm.
- Debido a su atenuación posee poco alcance, alrededor de 50 a 100 m.



**Figura 2.28. Estructura molecular del PMMA.**

*Perfluorinada o Fibra plástica CYTOP o TEFLON.*

- Su material base CF (Carbono-Flúor).
- Poca atenuación, debajo de los 20 dB/Km.
- Opera en excelentes condiciones en las tres ventanas 650, 850, 1300 nm.
- Largo alcance 1Km.



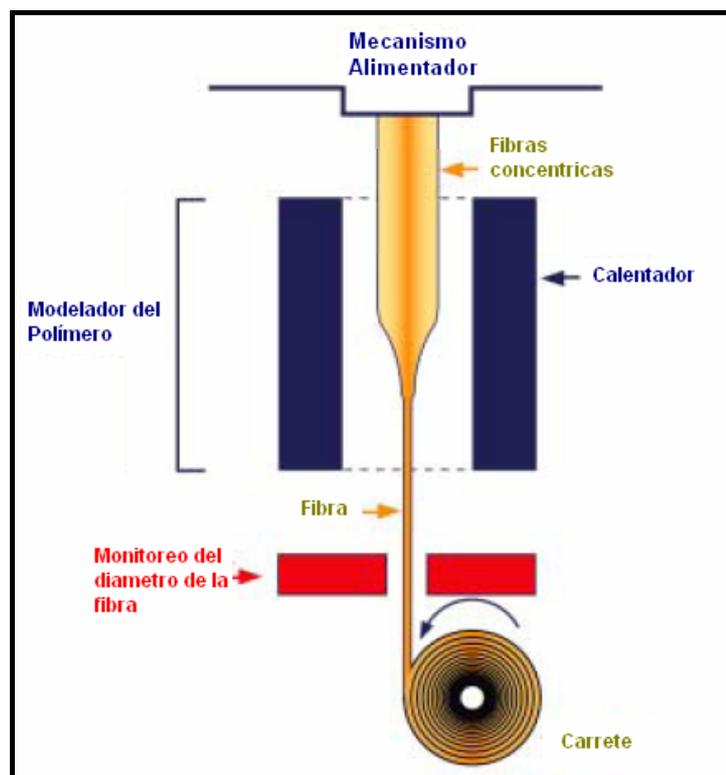
**Figura 2.29. Estructura molecular del CYTOP.**

Esta variedad de materiales usados en la construcción de fibra óptica plástica, se combinan con los dos principales tipos de fibras que existen: de índice de paso o de índice gradual, teniendo así una variedad de POF a escoger.

Su fabricación es variada, y a continuación se hace una brevísima reseña de algunos de los diferentes procesos usados en su construcción.

Proceso de modelado cilíndrico.

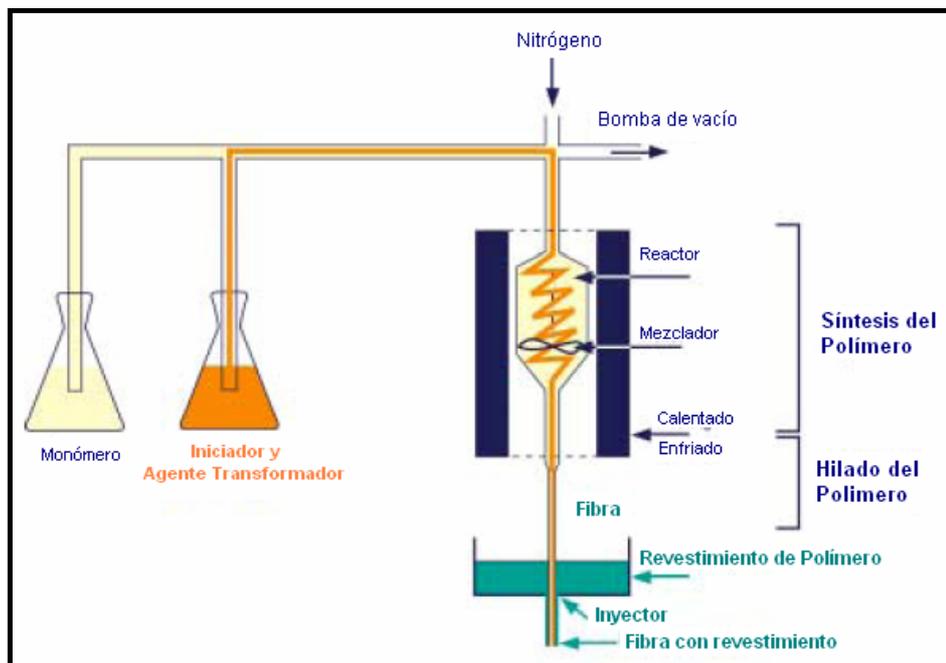
Concéntrica mente son fabricados varios cilindros de materiales plásticos con diferentes índices de refracción, estos materiales son calentados hasta que la fibra pueda ser moldeada. Este procedimiento se lo utiliza para fabricar fibra óptica de índice de paso y de índice gradual, ya sea esta de vidrio o plástico, funcionando de mejor manera en la producción de GI-POF.



**Figura 2.30. Modelo cilíndrico.**

*Proceso de síntesis por horneado.*

Un diseño de síntesis por horneado es simplemente la conversión de un material crudo en un producto terminado por medio de altas temperaturas. Esto se inicia con la destilación de los monómeros a los que se les añade un iniciador y un regularizador de polimerización. El proceso de estiramiento se lo realiza a través de un inyector de nitrógeno, el cual ayudado de un proceso de calentamiento y enfriado rápido realiza la sinterización del polímetro, luego se añade un recubrimiento de polímetro con diferente índice de refracción a la salida del hilado del primer polímero. Este proceso sirve para fabricar únicamente POF de índice de paso

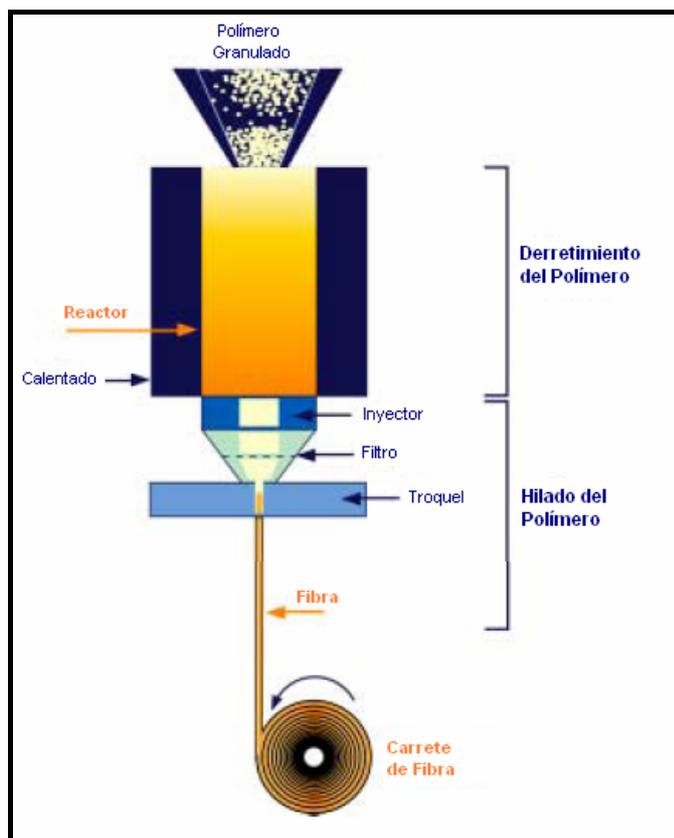


**Figura 2.31. Proceso de síntesis por horneado.**

*Proceso de hilado por derretimiento.*

En este proceso el polímero es derretido por completo y es presionado hacia un troquel, donde es filtrado e hilado al vacío, la capa de revestimiento es aplicada luego de la formación del núcleo. Las ventajas de este modelado de fibra son dos: la primera es la velocidad del proceso y la segunda es la posibilidad de fabricar varias fibras a la vez, la desventaja es el costo del montaje de equipo. Sirve

para la fabricación de POF de índice de paso y de índice gradual.

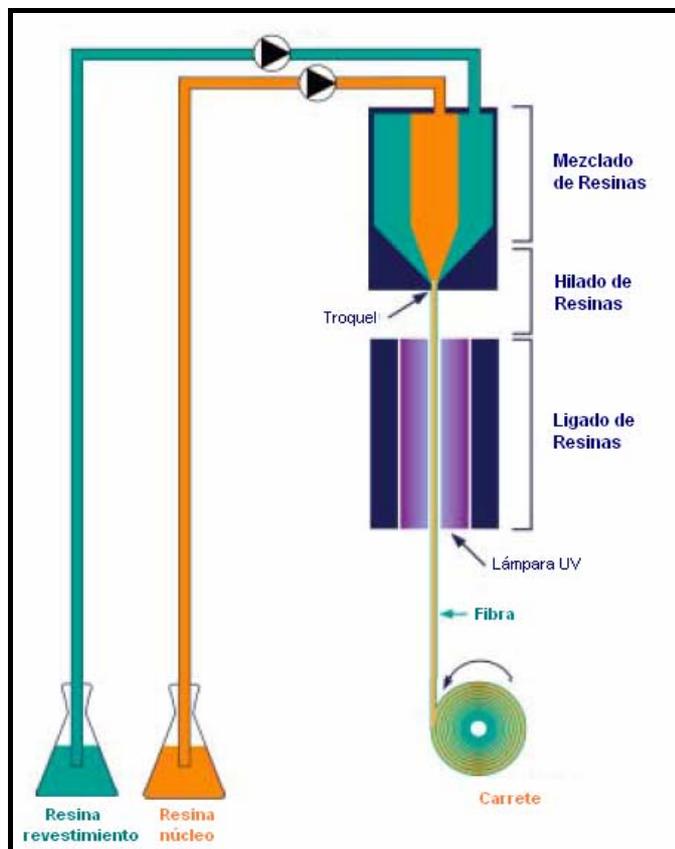


**Figura 2.32. Hilado por derretimiento.**

Ligado cruzado de resinas por medio de UV.

Las resinas tanto del revestimiento como del núcleo son bombeadas hacia el reactor. Las resinas líquidas fluyen a través de un inyector que las lleva

a una línea de rayos UV donde son ligadas y fusionadas, este es un proceso continuo, por lo tanto rápido; y sirve para la fabricación de POF de índice de paso y gradual.



**Figura 2.33. Hilado cruzado UV.**

### 2.3.3.3. Avances recientes.

Existen muchos avances en los últimos años en lo que respecta a la POF, todos aquellos apuntados hacia sus dos principales falencias: su atenuación y la falta de estandarización de su uso. Y un estudio importantísimo en todos los medios de transmisión, que es como optimizar su ancho de banda.

Nexans<sup>1</sup> la compañía líder mundial en la industria del cable, ha probado con múltiples experimentos que su solución de Fibra Óptica Plástica (POF) soporta la transmisión a 850 NM. Gigabit Ethernet sobre distancias mucho mayores a 275 m. que especifica el estándar IEEE 802.3z para la fibra óptica convencional de 62,5/125 micras.<sup>2</sup>

Las nuevas fibras ópticas plásticas (GI-POF) de Nexans están siendo desarrolladas en su Centro

---

<sup>1</sup> Nexans SA, Compañía francesa de ingeniería. Es la más grande en la fabricación de cables en el mundo. [www.nexans.com](http://www.nexans.com)

<sup>2</sup> Mas a fondo se puede encontrar información en el informe:  
J. Goudeau, G. Widawski, B. Bareel, M. Rossbach, R. Helvenstein, L. Huff.: GI POF FOR GIGABIT ETHERNET LINKS,

Internacional de Investigación en Lyon (Francia) a base de materiales polímeros de pureza ultra alta. Una serie de pruebas han sido llevadas a cabo utilizando unas fibras GI-POF. En una de las pruebas, un enlace de 400 metros soportó de forma satisfactoria la transmisión de paquetes Gigabit Ethernet alcanzando sobradamente los objetivos de tasa de error de bits.

Los ensayos fueron realizados usando un chasis IXIA<sup>1</sup> que contiene tarjetas GbE a 850 nm capaces de operar en full duplex a una tasa de datos de 1Gbps. El dispositivo IXIA recogió todos los errores, tramas fragmentadas, incompletas o perdidas. Durante los procesos de ensayo, más de tres billones ( $3 \times 10^{12}$ ) de tramas fueron transmitidas sin ningún error, excediendo los objetivos de tasa de error de bits recogidos en 802.3z.

Pero esta compañía sigue en la prueba de

---

<sup>1</sup> IXIA es un proveedor de sistemas de prueba de alto desempeño. [www.ixiacom.com](http://www.ixiacom.com)

transmisiones que superen a la anterior, y se encuentran probando con éxito una transmisión de 10.7 Gbits sobre GI-POF a 850 nm con un VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Láser). Este cable óptico puede reemplazar fácilmente al cable 10GBASE-T de cobre, ya que tiene múltiples ventajas como el reemplazo de 8 hilos de cobre por tan solo 2 cables ópticos, es decir, reemplazar un diámetro de un centímetro a medio centímetro; modulación directa sin necesidad de PAM (modulación por amplitud de pulsos), por lo tanto se reduce la diafonía (cross-talk) así como se reduciría potencia en el transmisor de 15 W. a menos de 1,5 W.

La comunicación mediante WDM (multicanalización por división de longitud de onda) también ya es una realidad para los sistemas ópticos basados en plástico. Se han obtenido resultados exitosos en experimentos de multi-canalización por división de longitud de onda usando módulos de LED rojos y verdes (650 y 495 nm.) a distancias de 20 metros y

con velocidades mayores a 250 Mbps.<sup>1</sup> El uso y desarrollo de este sistema puede significar una futura reducción de costos en cuanto a transmisión full-duplex fibras se refiere, ya que se utilizaría un solo hilo óptico.

Pero uno de los avances mas importantes y significativos para la POF, como ya se indicó antes, es la estandarización de su uso: primero por la MOST<sup>®</sup> y luego por la IEEE donde la POF es una de las principales soluciones del estándar 1394b<sup>2</sup> para la conectividad de audio, video, fotografía digital, impresoras, PCs y TV de alta definición a velocidades superiores a 400 Mbps y distancias menores a 100 metros.

---

<sup>1</sup> M. Yonemura, A. Kawasaki, M. Kagami, H. Ito, K. Terada, Y. Inui, K. Sato y I.Hosotani. 250Mbit/s Bi-directional Single Plastic Optical Fiber Communication System. R&D Review of Toyota CRDL Vol. 40 Nº 2.

<sup>2</sup> También conocido como Firewire<sup>®</sup> o i-Link<sup>®</sup>.

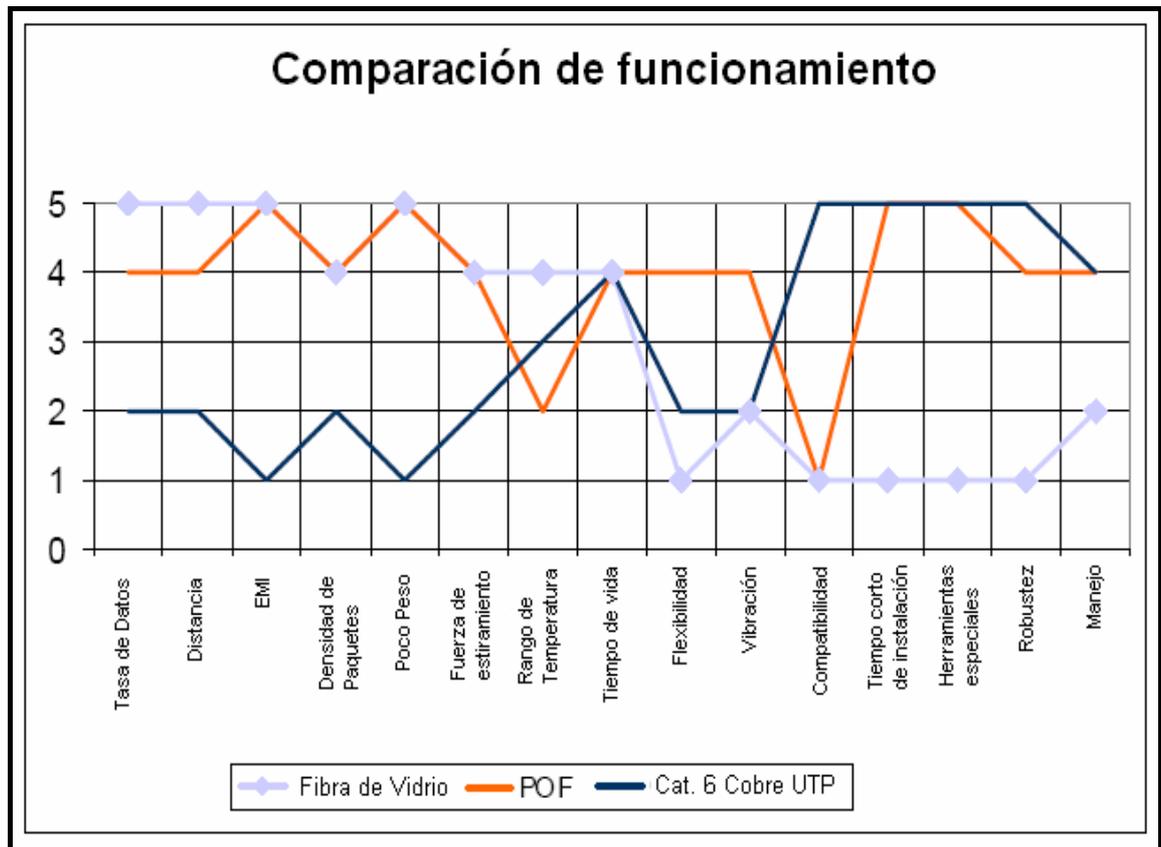
#### **2.3.3.4. Comparación de la fibra óptica de plástico con otros medios de transmisión.**

Las ventajas que posee la fibra óptica en general (plástica y de vidrio) con respecto a los otros medios de transmisión como el cobre y sus estándares derivativos en cableado (UTP, coaxial, etc. en todas sus categorías.) han sido ya mencionados en los capítulos anteriores, en la figura 2.34 hay una comparación entre POF, GOF y UTP.

Tenemos como ventajas de la POF:

- Mejor funcionamiento del sistema y mayor rendimiento.
- Alta calidad de transmisión.
- Mayor capacidad y ancho de banda (algunos casos).
- Menor atenuación.
- Inmunidad al ruido eléctrico.
- Inmunidad al ruido (electromagnético EMI).
- Ausencia de diafonía.

- Menores tasas de error (BER).
- Seguridad de los datos transportados.
- No es un conductor, por lo tanto esta aislado eléctricamente.
- No requiere tierra común.
- Inmune a descargas eléctricas.
- Peso y tamaño.
- Es resistente a la corrosión.
- Resistente a temperaturas variables.
- Es flexible.
- Bajo costo por canal.
- Menor mantenimiento.
- Alta privacidad de transmisión.



**Figura 2.34. Comparación de la fibra plástica con otros medios de transmisión.**

Sin embargo, tiene algunas desventajas entre frente al cobre y estos son: su costo y su aún no definida estandarización. Aparentemente la POF es una mejor solución que el cobre, pero debemos analizar ahora las ventajas que posee la nueva tecnología POF sobre la GOF y estas son:

- Componentes más simples y menos costosos.
- Menor nivel de potencia en el transmisor.
- Menos pesada.
- Más flexible.
- Más manejable y fácil de conectar, ya que POF tiene un diámetro de 1 mm.
- Los equipos pruebas son más baratos.
- Mayor seguridad que algunos sistemas de vidrio, ya que no requiere el uso de fuentes láser.
- Empalmes en menor cantidad de tiempo y con menor entrenamiento (5 a 10 minutos).

Aunque también posee algunas desventajas frente a fibra de vidrio, que los fabricantes se encuentran tratando de corregir:

- Alta atenuación durante la transmisión.
- Aún un pequeño número de proveedores.
- Carencia de estándares.
- Carencia de conocimiento entre los usuarios, es decir, falta de mercadeo y difusión.

- Producción limitada, que ha mantenido a los clientes privados de experimentar el potencial de la POF.
- Se encuentra todavía en una etapa de pleno desarrollo.

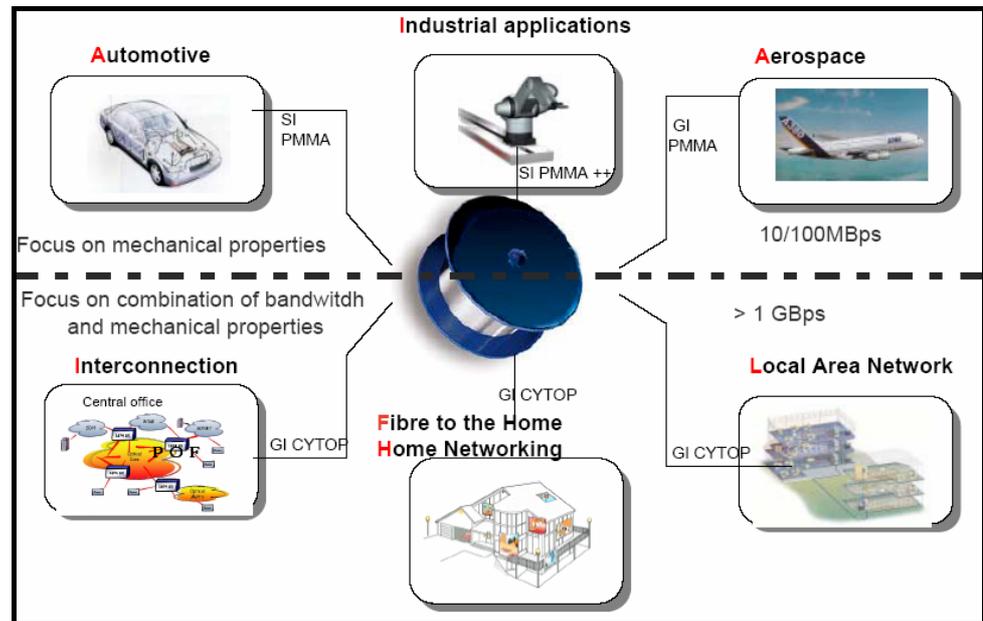
#### **2.3.3.5. Aplicaciones.**

Recientes investigaciones de mercadeo describen un crecimiento de más del 20% en ventas de POF del 2003 al 2006, alcanzando hasta el año 2006 ventas de casi 2 billones de dólares.<sup>1</sup> Contrario a la fibra de vidrio, la cual es principalmente usada en las telecomunicaciones, POF tiene diversas aplicaciones en muchas industrias, como automatización de controles, iluminación, automovilismo, y las redes LAN de poca extensión.

Siendo los campos más importantes los controles industriales, las redes LAN y el área automotriz.

---

<sup>1</sup> Fuente: "Plastic Fibre Makes Light Work of Industrial Comms", Richard Beach, *The Industrial Ethernet Book*, septiembrember 2003.



**Figura 2.35. Diversas aplicaciones de la fibra plástica.**

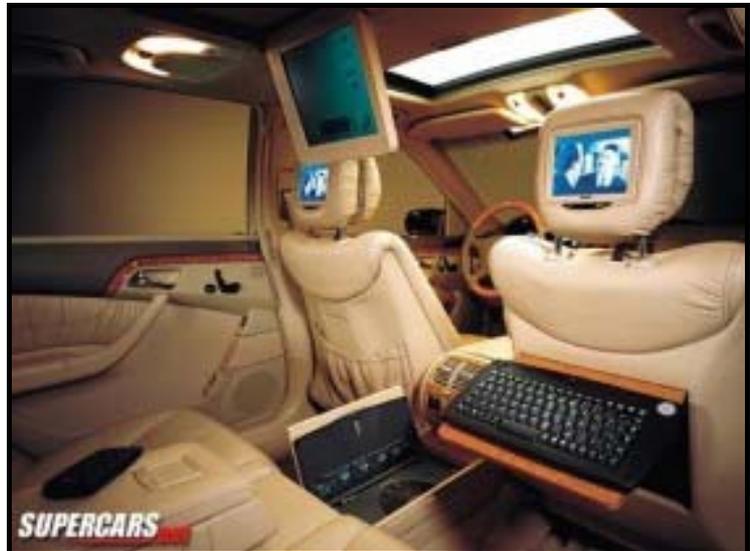
La principal causa de la demanda de POF en los controles industriales, es que este campo necesita un medio de transmisión que resista la EMI causada por el alto voltaje y la alta corriente que manejan sus dispositivos. La POF nos da la facilidad de instalación donde personas con un mínimo de entrenamiento pueden realizar conexiones de POF. Las conexiones de datos en los vehículos modernos como autos, camiones y aeroplanos usan POF como medio de transmisión de señales y

transferencia de luz. El plástico es mas barato y fácil de usar, las conexiones sencillas y su resistencia son grandes ventajas en la aplicación de esta tecnología en lugar del cobre. Así como el soportar cambios de temperatura que van desde 0° a 90° C, el manejo de ambientes peligrosos donde se usa combustible, caminos salinos, sol, agua, etc.

En el año 2000, el constructor alemán de automóviles Daimler-Benz<sup>®</sup> observando que el incremento en el uso de componentes digitales en los automóviles aumentaba también el peso, la susceptibilidad al EMI y la complejidad del cableado, desarrolló una manera de reducir costos y solucionar sus problemas: el anillo POF, se dio cuenta que su anillo puede ser la solución que necesitaran los futuros automóviles y convenció a otros seis constructores de autos europeos, incluyendo BMW<sup>®</sup> y Volkswagen<sup>®</sup>, a unirse y desarrollar un estándar llamado MOST<sup>®</sup> (Sistema de Transporte Orientado a Multimedia).<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> [www.mostcooperation.com](http://www.mostcooperation.com)

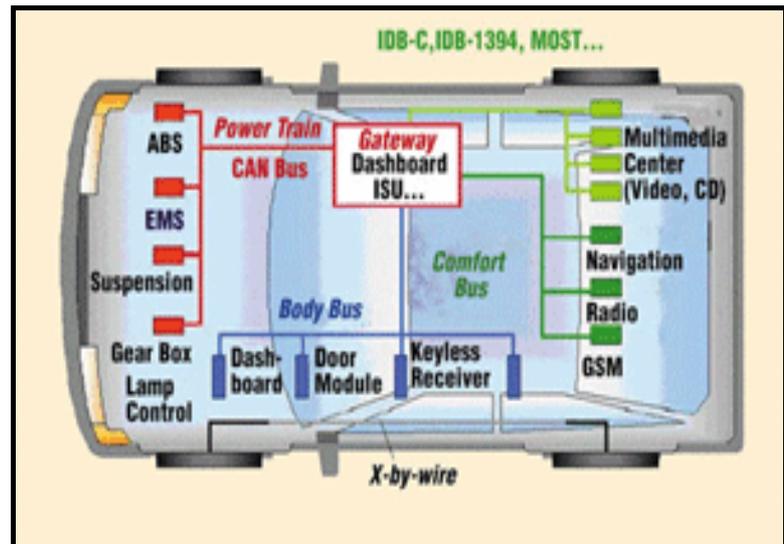


**Figura 2.36. Vehículo con servicios multimedia equipado con POF.**

Ahora la MOST<sup>®</sup> Cooperation posee 16 miembros, incluyendo General Motors Corporation<sup>®</sup>, y tiene más de 60 surtidores de repuestos y equipos de POF para automóviles en todo el mundo.

El sistema MOST original fue diseñado a 25 Mbps, y la siguiente generación fue de 50 Mbps, esta

velocidad está planeada en incrementarse a 150 Mb/s a finales del 2006.



**Figura 2.37. Redes en automóviles.**

Las aplicaciones de acoplamiento de la luz usadas para iluminación fueron patentadas por W. Wheeler en 1880.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jaramillo Salgado, Oscar. "TRANSPORTE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA A TRAVES DE FIBRAS OPTICAS: ACOPLAMIENTO FIBRA-CONCENTRADOR Y ESTUDIO TERMICO", Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.

Su concepto usaba una simple bombilla central la cual reflejaba luz a otros cuartos por medio de ductos o canaletes. Sin embargo, el hecho de construir canales y usar una sola fuente de luz central es poco práctico, y la fibra óptica de plástico es una solución en estas aplicaciones por su bajo costo. Algunos ejemplos son:

- Iluminación auxiliar en microscopios, debido a su pequeño diámetro.
- Iluminación (dentro del cuerpo humano) para procedimientos médicos.
- Señalización e iluminación ornamental, como en edificios o las señales de tránsito.
- Iluminación alternativa en áreas de peligro como aquellas que contienen gases explosivos, combustibles, etc.



**Figura 2.38. Iluminación ornamental con fibra óptica plástica.**

En 1976, la Fuerza Aérea Americana, como parte del programa ALOFT,<sup>1</sup> reemplazó el cableado de cobre en un jet A-7 por un cableado óptico. El cableado original pesaba 40 kg. y tenía una longitud de 1260 metros, con 302 tramos de cables. El reemplazo óptico pesaba 1.7 kg con una extensión de 76 metros y conteniendo tan solo 12 fibras.

---

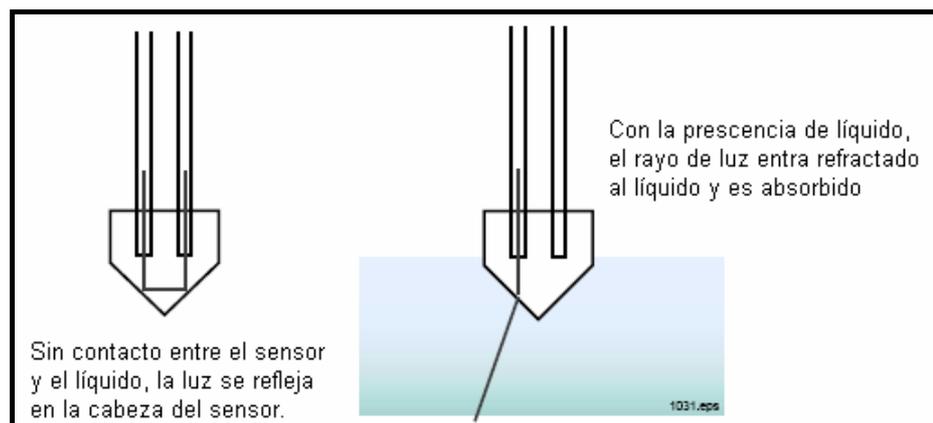
<sup>1</sup> Airborne light optical fiber technology (ALOFT). Mas en “Reliability in fiber optic cable harness manufacturing”. MCCOY, BRUCE M. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, 8th, San Jose, CA, Oct 17-20, 1998, Technical Papers. Part 1 (A89-18051 05-06).

Las condiciones de operación en un aeroplano son similares a las que se tienen en un automóvil, por lo que son menos manejables aun los sistemas eléctricos que los ópticos. Los aviones poseen cambios más bruscos de temperatura, vibraciones y mal clima. Y los últimos acontecimientos del programa ALOFT y de otros programas militares demostraron la capacidad de la fibra plástica operando en condiciones severas, dando un rendimiento superior al cobre.

La fibra óptica plástica también puede ser usada para detectar estímulos externos como presión, campos magnéticos, temperatura, etc. Estos estímulos pueden ser medidos por medio de las características de la luz y pueden ser clasificados por sus principales operaciones:

- Sensores de intensidad, donde la intensidad de transmisión de la luz cambia con estímulos externos.

- Pruebas ópticas, donde las propiedades de transferencia de la luz censan objetos cercanos.
- Sensores de color, que detectan cambios de energía o de longitudes de onda transmitidas por la fibra.
- Sensores de polarización, detectan cambios en la polarización de la luz.



**Figura 2.39. Sensores de pruebas ópticas.**

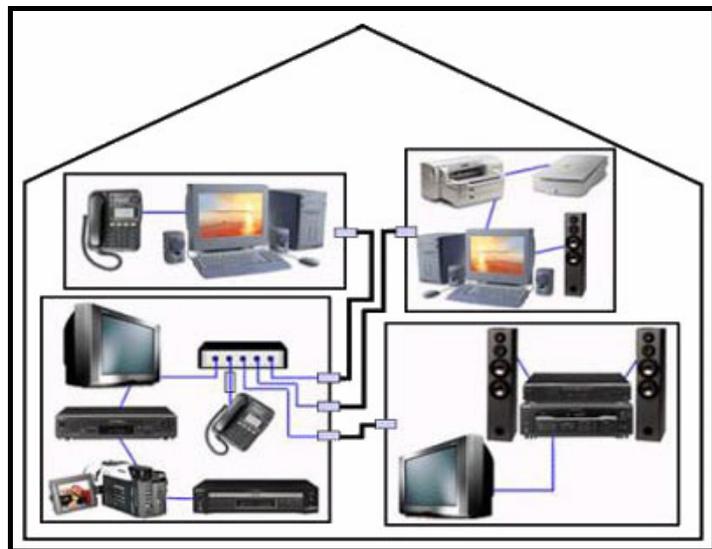
Otro de los campos potenciales de la POF, sin duda alguna son las transmisiones de datos como transmisiones telefónicas, TV por cable, o enlaces de redes LAN de pequeñas dimensiones como

enlaces edificio-edificio donde la POF tiene una eficiencia excelente.

Las redes LAN son probablemente las aplicaciones más importantes en este campo. En los tiempos pasados, la fibra óptica era usada únicamente para el backbone de los enlaces de telecomunicaciones, sin embargo, la cableado horizontal (de los closets hasta los terminales) aun seguían siendo de cobre.

Obviamente, todos los administradores de redes quisieran tener las ventajas de ancho de banda que provee la fibra desde los puntos de acceso hasta sus computadoras, pero la fibra es más costosa que el cobre. Pues esto será posible en un par de años, donde el costo de la POF igualara al precio del cobre, y tomando en cuenta la mayor facilidad de instalación de la POF sin duda alguna por fin se habrá encontrado la manera de tener “fibra-al-escritorio”. Los costos se reducirán conforme el paso del tiempo. Una NIC para cableado de cobre esta alrededor de \$ 10, mientras que una tarjeta de

fibra plástica cuesta \$ 80. La pregunta es si el valor ahorrado en la NIC justifica las comodidades de tener el ancho de banda mayor que brinda la fibra óptica.<sup>1</sup>



**Figura 2.40. Multimedia integrada con POF en el hogar.**

<sup>1</sup> POF: Fiber Without the Pain, Aug 1, 1998 12:00 PM, By Paul Rosenberg, Consulting Editor, EC&M.

## **CAPITULO 3**

### **3. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES OPTICO COMPLETO CON FIBRA PLASTICA COMO MEDIO DE TRANSMISION.**

Un sistema de comunicaciones de fibra óptica comprende tres elementos básicos: una fuente de luz, un fotodetector y una fibra óptica de baja pérdida y baja dispersión. Ya se discutió anteriormente acerca de estos tres elementos por individual. Ahora se examinará el rol de cada uno en el contexto de diseño, operación y desempeño en un sistema de comunicaciones óptico.

La selección de dispositivos para requerimientos del análisis y/o simulación son necesarios para determinar si el sistema a diseñar cumplirá con los requerimientos especificados.

Como una primera aproximación se puede utilizar un método analítico para calcular el presupuesto de potencia del enlace como también los límites de atenuación y los tiempos de subida y bajada para garantizar la integridad de los datos transmitidos.

El diseño de un enlace óptico envuelve algunas variables relacionadas; entre los requerimientos claves para el análisis de un enlace tenemos:

1. Distancia de transmisión deseada (o posible).
2. Ancho de banda del canal o tasa de datos.

Es muy importante mencionar que es difícil tener un sistema de comunicaciones óptico que pueda transmitir señales tanto analógicas como digitales; en la práctica se lo puede hacer pero en general si un sistema se diseña para transmitir señales digitales difícilmente podría desempeñarse de la misma manera con señales analógicas ya que para su diseño se consideraron diferentes condiciones.

Para la implementación del sistema de comunicaciones óptico se usará la fibra óptica de plástico de 1mm manufacturada por Mitsubishi Rayon Co.,Ltd. la cual es fabricada con resina de Polimetil Metacrilato (PMMA). Para los acoples optoelectrónico se usarán los dispositivos de plástico de la compañía Industrial Fiber Optics Inc. el cual permite un acople sencillo y efectivo.

### **3.1. Criterio de diseño de un transmisor óptico.**

La fuente de luz es la parte más importante de un transmisor óptico, pero realmente no basta con ella para hacer funcionar el sistema. Lógicamente una cubierta o carcasa es necesaria para montar y proteger a la fuente de emisora de luz, y el circuito electrónico que actúa como interfaz entre la entrada eléctrica de la señal y su posterior transmisión óptica en la fibra. Para que exista el acople de una señal eléctrica a una señal óptica es necesario un circuito de varias etapas.

Sin embargo, el diseño puede variar desde el montaje de un simple LED con conexiones eléctricas simples, a un diseño de alto desempeño con circuitos controladores y monitoreo constante de temperatura y potencia, etc.

Los elementos básicos que comúnmente se encuentran en un transmisor son:

- Carcaza o cubierta.
- Interfaz electrónica.
- Pre-procesamiento electrónico.
- Circuitos manejadores.
- Fuente de luz.
- Interfaz óptica.
- Sensor y control de temperatura.
- Monitor óptico.

#### *Cubierta.*

La cubierta más simple para un transmisor de fibra óptica es una caja de tamaño apropiado a la que debe ser convenientemente montada con tornillos u otros métodos el circuito impreso correspondiente al diseño del transmisor. El transmisor debe encontrarse bien protegido por esta caja mecánica, la cual estará debidamente señalizada en el exterior, mostrando como requisitos mínimos: las conexiones eléctricas y ópticas, así como su debida alimentación eléctrica.

### *Interfaz electrónica.*

La interfaz electrónica pueden ser cables, pines o algún otro estándar de conexión. Como se dijo anteriormente, los transmisores cuentan por lo menos con dos conexiones simples, otras pueden resultar un poco más complejas, requiriendo fuentes eléctricas adicionales, interfaces de realimentación, resultando así circuitos con más de una decena de conectores.

### *Circuito Manejador.*

El tipo de circuito de manejo depende de los requerimientos de aplicación. Los LED funcionan mejor siendo manejados por una fuente de corriente, por este motivo, la mayoría de señales electrónicas que están en parámetros de tensión o voltaje, deben ser convertidas a corriente. Algunos LED trabajan mejor con ciertos arreglos electrónicos que adaptan de mejor manera sus necesidades de corriente. Por ejemplo, el manejo apropiado de la forma de onda puede reducir de manera efectiva el tiempo de subida de un LED barato, permitiendo así su uso con un ancho de banda mayor que el especificado. Los láseres generalmente ya están internamente prediseñados para recibir la señal en parámetros de voltaje.

### *Fuente de luz.*

Las fuentes de luz en los sistemas de fibra óptica pueden ser tanto LED como diodos láser. Este tópico ya fue discutido en la sección de fototransmisores, tratada anteriormente.

### *Interfaz óptica.*

Existen varios modelos de interfaces ópticas, un buen número de estándares de uso en cuanto a conectores se refieren existen hoy en el mercado, ellos consisten en montajes mecánicos que acoplan de manera efectiva al emisor lumínico con la fibra y se ensamblan en la parte externa de la cubierta de los transmisores. En el capítulo de elementos de interconexión se tratara más a fondo de los conectores existentes para sistemas de transmisión óptico.

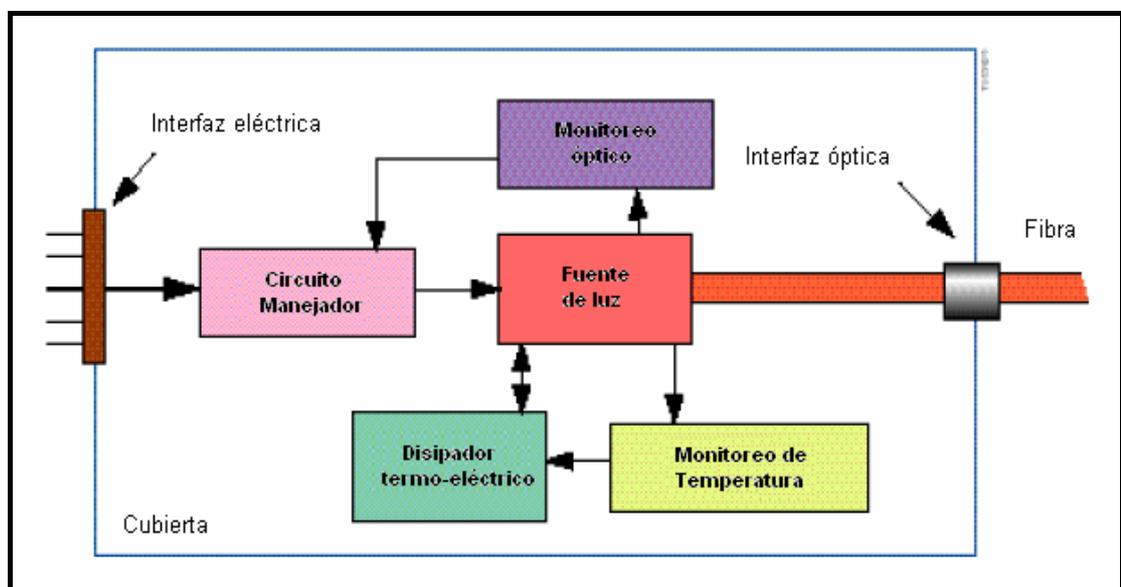
### *Sensores de control y temperatura.*

Estos circuitos están diseñados para aquellos transmisores que funcionan con diodos láser, debido a que su potencia de salida depende directamente de la temperatura. Un elemento sensor de temperatura registra el calor en los diferentes componentes y lo compara con una referencia, este esta adaptado a un disipador de calor en el diodo láser que se activa a medida que la temperatura

sube. Estabilizar la temperatura del diodo láser mejora su funcionamiento y eficiencia a la vez que alarga su tiempo de vida.

### *Monitor óptico.*

Algunos transmisores ópticos incluyen también una interfaz visual con el usuario. La misma que muestrea una parte de la potencia óptica y la convierte en señales eléctricas (asemejándose a un medidor de potencia óptica). Estas señales eléctricas son mostradas visualmente por medio de displays o similares y se usan para controlar y ajustar la entrada de corriente inyectada a la fuente de luz, estabilizando así su potencia óptica de salida.



**Figura 3.1. Elementos más comunes en un transmisor de fibra óptica.**

### **3.2. Criterio de diseño de un receptor óptico.**

El receptor óptico es una parte esencial de cualquier sistema de transmisión por fibra óptica, tan importante como la fibra o el transmisor. El receptor convierte las señales ópticas transportadas por la fibra en impulsos eléctricos. Así mismo como los transmisores, el contenido entre el final de la fibra y la obtención de la señal eléctrica es variable, dependiendo de los requerimientos del sistema.

Los receptores de fibra óptica tienen diferentes variedades, desde un fotodetector debidamente energizado hasta un sofisticado sistema de transmisión de alta velocidad. La descripción de un receptor es más complicada que la del transmisor ya que existen dos tipos análogos y digitales. Y sus elementos básicos son:

- Cubierta.
- Interfaz electrónica.
- Interfaz óptica.
- Detector.
- Preamplificador de bajo-ruido.
- Amplificador principal.
- Procesador de la señal.

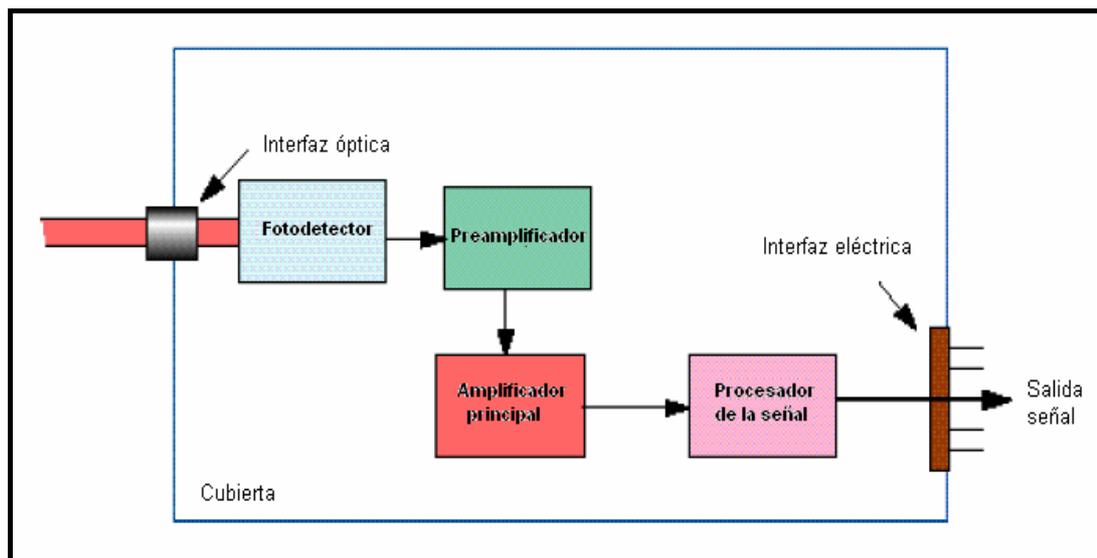
La información que corresponde a la cubierta y las interfaces electrónicas y ópticas ya fueron cubiertas en la sección anterior de transmisores y son aplicables de igual manera a los receptores. A su vez los fotodetectores fueron estudiados a fondo en su respectiva sección del capítulo 2.

Los preamplificadores dan los dos más importantes niveles de desempeño en un sistema de fibra óptica: el ancho de banda y la detección de señales muy pequeñas. En el preamplificador, la señal es muy débil y es muy susceptible al ser extraída del fotodetector. Una medida típica de corriente de entrada al preamplificador es de 0.1 a 100  $\mu\text{A}$ .

La función de transferencia de un preamplificador de fibra óptica tiene dimensiones de voltios por amperios (la mayoría de amplificadores poseen funciones de transferencias voltios-voltios). Esta dimensión inusual, es debido a que la salida de los transceptores ópticos es en parámetros de corriente (foto transmisores/receptores son elementos manejados por corriente) y les da un nombre alternativo, amplificadores de transimpedancia.

### *Amplificador principal.*

El amplificador principal obviamente amplifica la señal de salida del amplificador de transimpedancia a niveles mucho mayores. Valores típicos deberían ser de 0.7 a 3.4 voltios en sistemas digitales TTL. En sistemas análogos, el amplificador principal puede dar una potencia necesaria para manejar cargas de 50 ohmios.



**Figura 3.2. Elementos más comunes en un receptor de fibra óptica.**

El detector, el preamplificador y el amplificador principal son los mismos tanto para receptores análogos o digitales, pero los procesadores de señal pueden ser diferentes para cada uno de estos sistemas, de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Hemos revisado los principales componentes en un enlace de fibra óptica incluyendo cables, fuentes de luz y detectores ópticos. Sin embargo, hay que hacer una decisión entre todas estas opciones y el primer paso en planear un diseño de un sistema de transmisión óptica es definir los requerimientos de aplicación. Y aquí las principales preguntas son dos: ¿Qué tan rápido? y ¿Qué tan lejos? Las respuestas a estas dos preguntas básicas determinarán hardware de nuestro sistema.

Con la distancia y la tasa de transmisión establecida se puede empezar a tomar decisiones en detalles más específicos como:

- Tipo de fibra: mono-modo o multi-modo.
- Material de la fibra.
- Diámetro del núcleo y apertura numérica.
- Atenuación de la fibra.
- Rango de operación en longitud de onda.

- Tipo de fuente LED o láser.
- Potencia de transmisión.
- Tipo de detector.
- Sensibilidad del receptor.
- Ancho de banda del receptor y el transmisor.
- Relación S/N o BER.
- Conectores y pérdidas en conectores.
- Empalmes y pérdidas en ellos.
- Parámetros de tendido.
- Parámetros mecánicos
- Costo y rentabilidad.

Muchas de estas variables están interrelacionadas, por ejemplo: la potencia del transmisor depende del tipo de fuente. Mucho de los sistemas requieren de un equilibrio entre muchas de estas variables, pero siempre manteniendo un equilibrio entre desempeño óptimo del proyecto y costo.

El desempeño óptimo de un sistema de transmisión óptico es muy similar al de un sistema de transmisión eléctrico de datos. En la práctica real los datos transportados son afectados por ruido aleatorio generado aleatoriamente dentro o fuera del circuito y

sobre todo por la atenuación de las señales a medida que se recorren distancias. La calidad de transmisión de los datos es generalmente expresada en sentido de la relación señal a ruido (S/N) para sistemas análogos, y en tasa de error de bits (BER) para sistemas digitales.

La relación señal a ruido es la tasa de potencia de la señal entre la potencia del ruido en el receptor, comúnmente es expresada en dBs.

El BER es una función de la relación señal a ruido. Un BER típico para un sistema de telecomunicaciones es de  $10^{-9}$ , o un error en un billón de bits. Las interfaces de datos informáticos típicamente operan con BERs de  $10^{-12}$ .

### **3.3. Implementación del módulo de transmisión óptica.**

Los requerimientos básicos para las fuentes de luz usados en sistemas de comunicaciones ópticas dependen de la naturaleza de la aplicación. Tanto los LED como los LD son usados como fuentes. Los diodos LASER tienen la ventaja de mayor potencia, mayor velocidad y un ancho espectral mas angosto. Los LED tienen ventaja de ser robustos, confiables, bajo costo, largo tiempo

de vida y fácil diseño. Sin embargo sufren de anchos de banda relativamente bajos.

Solo la luz que logre ser inyectada a la fibra es útil. De esta manera el tamaño del área de emisión y el patrón de emisión pueden ser características importantes para la cantidad de luz que puede ser acoplada a la fibra. La fuente también tendrá un ancho espectral finito  $\Delta\lambda$  alrededor de la longitud de onda central de emisión. Este  $\Delta\lambda$  puede dar lugar a dispersión si llega a ser inyectado en la fibra. Inclusive en un solo "color" (longitud de onda) algunos modos estarán presentes.

La luz que fue aceptada por la fibra al llegar al otro extremo de la misma no tiene la misma intensidad, lo cual indica que la potencia de la luz ha sido atenuada en el trayecto de la fibra. La potencia de la luz generada por un LED depende de la cantidad de corriente que lo este polarizando, de esta manera la potencia óptica que emite un LED es proporcional a la corriente eléctrica que lo este polarizando y tendrá como máximo la potencia que emita cuando el LED este a su máxima corriente.

El ancho de banda de las señales transmitidas como luz dependerá del ancho de banda del dispositivo que las cree. En el caso del LED estas señales estarán ligadas a los tiempos de subida y bajada de este dispositivo.

Un modulo de transmisión óptica debe ser diseñado tomando en cuenta todas estas variables que como ya se menciona dependen de la naturaleza de la aplicación.

### **3.3.1. Generalidades y diagrama de bloques.**

Los circuitos de excitación para las fuentes de luz antes mencionadas tienen como función, convertir el voltaje de la señal a transmitir en una corriente modulada con un valor pico adecuado a las características normales de operación de la fuente óptica que se use. Hay muchos circuitos que pueden utilizarse como excitadores de fuentes ópticas y cada uno muestra ciertas características particulares, por lo que la selección de estos depende del tipo de sistema (analógico o digital), y del tipo de fuente de luz (LED o LD).

En los sistemas de transmisión analógicos por fibra óptica de distancias cortas sin repetidores, los LED son las fuentes ópticas preferidas, debido a que presentan mayor linealidad que los LD y su distorsión armónica es aceptable. Su circuito de excitación es simple, ya que no requiere compensación ni etapas de protección.

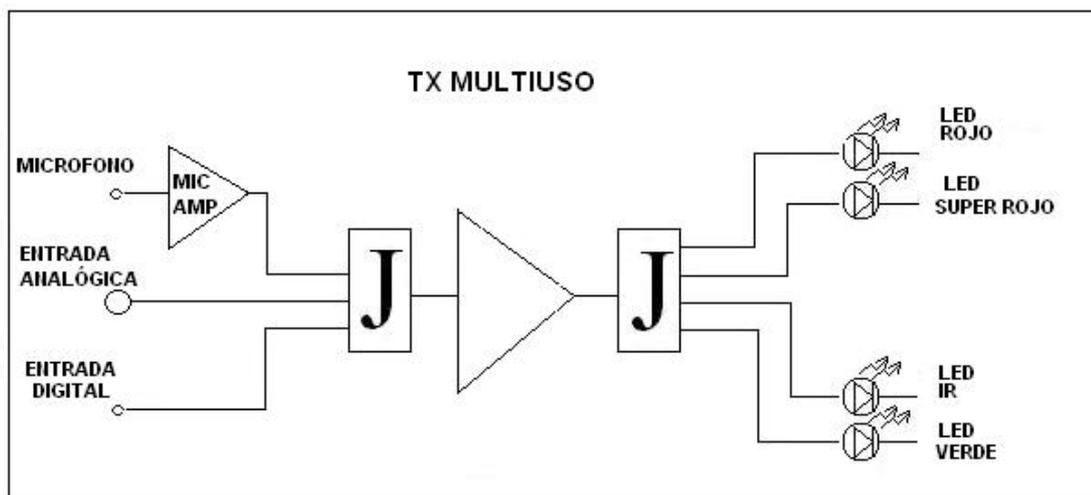
Para sistemas analógicos por fibras ópticas de banda ancha y distancias grandes de transmisión, las fuentes de luz utilizadas son los LD, debido a que proporcionan mayor rapidez y más potencia.

En los sistemas de transmisión digital por fibra óptica, el circuito de excitación transforma los niveles lógicos disponibles en su entrada a niveles de corriente adecuados para excitar a la fuente óptica.

Dada la impedancia dinámica que presentan el LED y el LD una sola etapa de amplificación de corriente puede usarse para modular la fuente óptica, esto puede lograrse utilizando un solo transistor de alta velocidad, con el fin de tener

tiempos de subida y de bajada pequeños en los pulsos ópticos de salida.

A continuación tenemos dos diagramas de bloques, el primero consta de dos entradas analógicas y una digital, estas pueden ser seleccionadas por medio de un jumper que esta representado como una caja con una letra J, las señales pasan al circuito manejador para luego poder seleccionar la salida entre algunos tipos de LED.



**Figura 3.3. Diagrama de bloques general del transmisor.**

En el otro diagrama se tienen dos entradas una analógica y una digital, la analógica se convierte en digital después de pasar por un convertidor análogo/digital y continua al circuito manejador, la otra entrada se conecta directamente al circuito madre que nos entrega señales eléctricas a partir de impulsos ópticos.

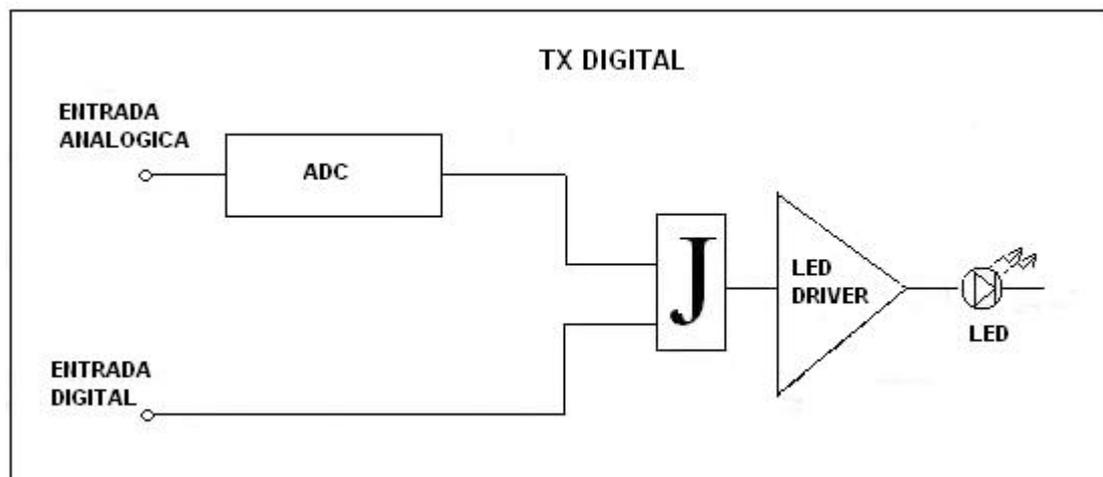


Figura 3.4. Diagrama de bloques del transmisor digital.

### **3.3.2. Esquema, consideraciones del diseño y dispositivos utilizados.**

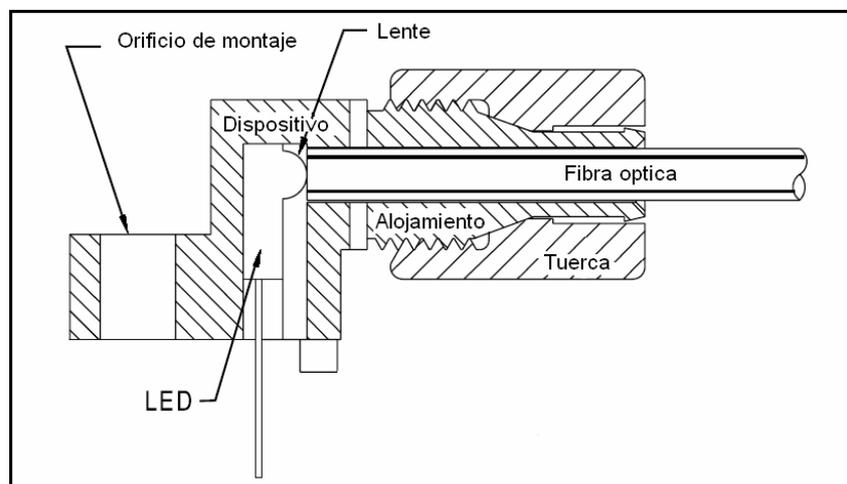
Se implementaron dos circuitos: uno digital y uno analógico. El circuito analógico es también capaz de transmitir señales digitales pero tiene un ancho de banda pequeño.

#### Consideraciones de diseño.

El primer punto que se debe considerar es la atenuación y el ancho de banda que tiene el medio de transmisión que vamos a utilizar. Para esta implementación se uso fibra óptica de plástico SUPER ESKA™ hecha con resina de PMMA de 1mm de diámetro de la compañía MITSUBISHI RAYON Co., Ltd. la cual tiene un ancho de banda de aproximadamente 40 MHz y una perdida de 0.15 dB/m @ 660 nm y es de índice escalonado. Debido a esto la fuente óptica que se utilizará es un LED rojo IF-E96 de la compañía INDUSTRIAL FIBER OPTICS Inc. que es el que corresponde con la longitud de onda que tiene menor atenuación.

El empaquetamiento del dispositivo tiene entre sus características un micro lente interno y un alojamiento de

precisión hecho con PBT<sup>1</sup> moldeado al dispositivo semiconductor con un orificio para que la fibra pueda ser fijada con una tuerca de aseguramiento una vez que el extremo de la fibra tope el micro lente; así de esta manera la mayoría de la luz emitida por el LED será acoplada a la fibra.



**Figura 3.5. Corte transversal del LED en la estructura de PBT.**

El IF-E96 puede manejar máximo 35mA, su tiempo de subida y su tiempo de bajada es de 0.1  $\mu$ s y su temperatura de operación esta entre -40 °C y 85 °C. Teniendo esta información podemos empezar a realizar algo de diseño.

<sup>1</sup> Politereftalato de Butileno (polybutylene terephthalate-PBT).

### *Circuito analógico.*

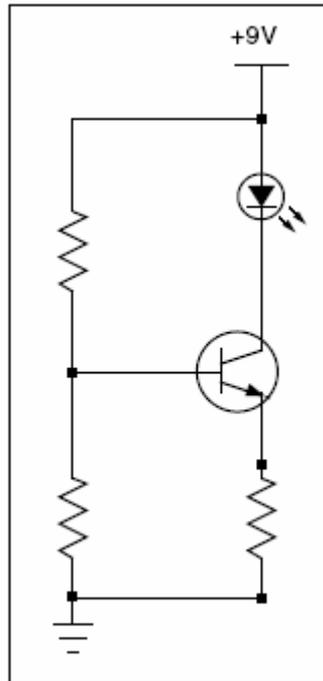
Diseñar un circuito manejador analógico de LED es similar a diseñar un amplificador clase A<sup>1</sup>. Debe tener el ancho de banda deseado, buena linealidad y sin recortes para las señales que van a ser inyectadas.

La parte principal del circuito transmisor analógico es el circuito manejador del LED, con el diseño que se implementó el circuito es compatible con señales analógicas así como con señales digitales de un ancho de banda bajo. Como la corriente máxima que el LED puede manejar es de 35 mA al usar señales analógicas podemos hacer que la señal cambie desde 1mA hasta 34 mA.

Para manejar el LED usaremos un circuito con transistor que fije en su base un voltaje fijo que pueda ser variado al tener una señal acoplada a la base. Contará con el LED en el colector y una resistencia a tierra en el emisor. Así la señal será modulada en corriente y la luz del LED cambiará proporcionalmente a la corriente.

---

<sup>1</sup> El modelo esta basado en una configuración que aparece en el libro:  
Malvino, Albert P.: Principios de Electrónica (Cuarta Edicion), McGRAW-HILL, 1991.



**Figura 3.6. Esquema del manejador de corriente.**

El voltaje ideal en la base para este caso en que la alimentación es 9 V sería la mitad del voltaje de alimentación para así poder tener la mayor excursión posible y no tener recortes. Para conseguir esto pondríamos dos resistores de igual valor para tener un divisor de voltaje en la base del transistor. El valor del resistor entre el emisor y tierra es muy importante porque es la variable que fijará los valores de corriente para el LED. Si se analiza la línea de carga del transistor tenemos que:

$$+9(V) = V_{LED} + V_{CE} + I_E R_E$$

Ahora tenemos que el voltaje del IF-E96 al estar prendido es +1.8 (V) y que la corriente de emisor es aproximadamente la misma que la corriente de colector.

$$I_E \approx I_C$$

Entonces tenemos que:

$$+9(V) = +1.8(V) + V_{CE} + I_C R_E$$

Para saber la recta de carga tomamos dos casos; cuando el voltaje colector-emisor es cero (se satura el transistor) y cuando la corriente del colector es cero (el transistor entra en estado de corte). Para poder dimensionar la resistencia del emisor nos importa más el caso cuando el transistor se satura ya que sabemos que la corriente del colector no debe pasar de los 35mA.

$$+9(V) = +1.8(V) + V_{CE} \rightarrow 0(V) + I_C R_E$$

$$9(V) - 1.8(V) = I_C R_E$$

$$7.2(V) = 35(mA) R_E$$

$$R_E = \frac{7.2(V)}{35(mA)}$$

$$R_E = 205.7(\Omega)$$

En el mercado de resistencias que encontramos en la calle Boyacá (Guayaquil) la que más se le acercaba es 220  $\Omega$ .

Ahora siguiendo con el análisis de la línea de carga podemos deducir que la corriente en el colector cuando se satura el transistor es de 32mA y que el voltaje colector-emisor cuando esta a punto de llagar a corte es de +7.2 (V). En este caso el voltaje del emisor será igual a  $V_E = 220(\Omega)I_C$  y puede variar de cero a +7.2 (V). Ahora entonces podemos saber los posibles niveles de señales que podríamos inyectar al circuito acoplado señales AC. Como información tenemos que el voltaje en la base del transistor debe estar +0.7 (V) arriba del voltaje del emisor. Entonces el voltaje en la base debe variar desde +0.7 (V) hasta +7.9 (V), así tenemos que podríamos inyectar una señal AC de 3.6Vpk.

Para poder acoplar la señal analógica al circuito se usará un capacitor que en su mayor parte actuará como un bloqueador de señales de corriente continua ya que para el peor de los casos su reactancia será menor por diez veces que la impedancia de entrada del circuito.

Para señales digitales no habrá mayor complicación lo único que se tiene que hacer es acoplar la señal directamente a la base del transistor sin conectar ningún capacitor que bloquee señales de corriente continua. Como alimentamos el circuito con +9(V) será muy practico usar un circuito digital CMOS que trabaje con el mismo voltaje de alimentación, así el integrado tendrá en sus salidas cero o +9(V). Cuando el voltaje sea cero en la base del transistor este funcionara en zona de corte, en este caso la corriente que pase por el LED no lo encenderá. En el otro caso cuando el voltaje en la base sea +9(V) el transistor estará en estado de corte y el LED funcionará a una corriente cerca de la máxima.

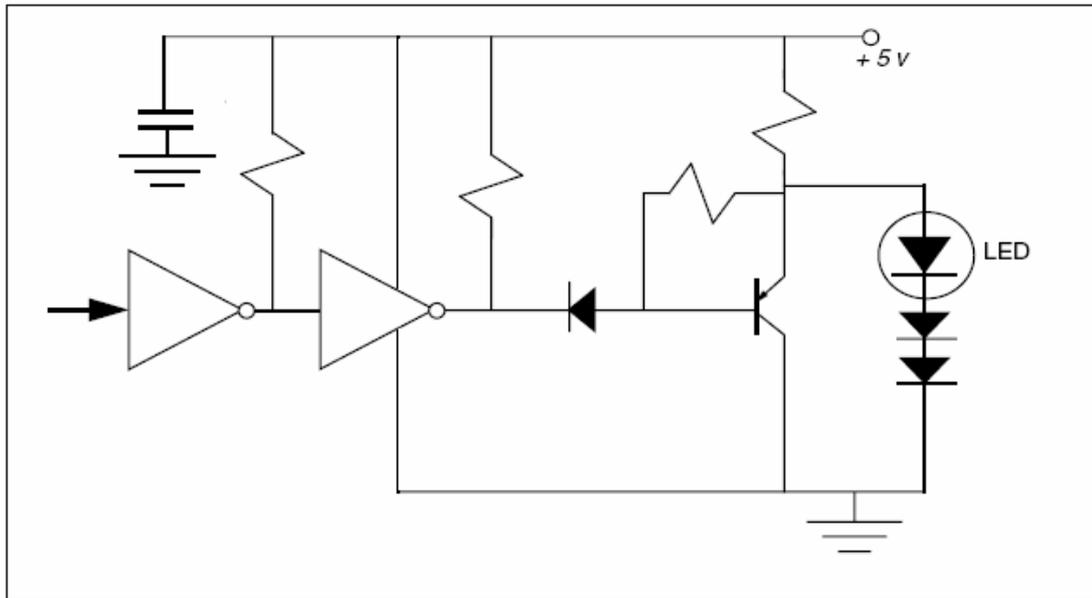
Si quisiera añadir una señal proveniente de un micrófono esta señal debería de pasarla primero por un amplificador

de 20dB de ganancia antes de inyectarla como señal analógica.

Debemos tener en cuenta que tipo de transistor usaremos para el circuito que maneje el LED, probablemente la solución que más se ajusta a nuestra necesidad es un PNP amplificador de propósito general. Hemos escogido el 2N3904 porque funciona muy bien tanto como amplificador así como conmutador, tiene un ancho de banda que excede nuestras necesidades aparte de ser muy fácil de encontrar en el mercado local.

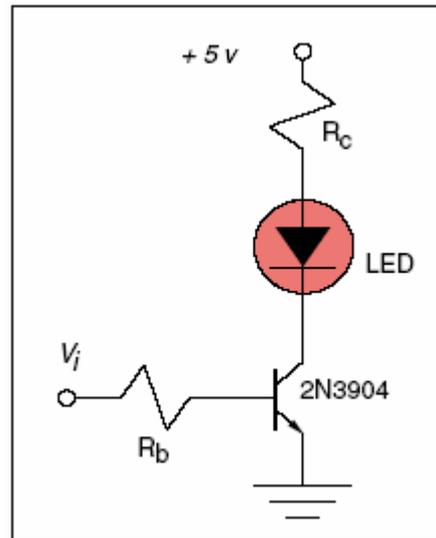
### *Circuito Digital*

Para el circuito digital contaremos con un integrado un transistor y un diodo mas algunas resistencias.



**Figura 3.7. Esquema del transmisor digital.**

Pero antes de llegar a este circuito se pasó por algunos circuitos relativamente más simples pero que pueden decir mucho de las consideraciones que se debe tener para un circuito que se encargara de manejar un LED. Por ejemplo se tiene el siguiente circuito con un transistor que puede ser conectado a la salida de cualquier integrado TTL o CMOS y manejar la corriente del LED a algunos Megahertz.



**Figura 3.8. Esquema de un modulador digital básico.**

El voltaje de entrada  $V_i$  que tendrá niveles digitales se encargara de saturar o cortar al transistor de esta manera cuando sea un alto el transistor estará en saturación y el LED se encenderá. De igual manera cuando la entrada cambie a un nivel bajo el transistor estará en corte y no existirá corriente que encienda el LED.

Ahora se debe calcular el valor de la resistencia del colector para que cuando el transistor se sature la corriente no sobrepase el nivel máximo que soporta el IF-E96.

Como ya sabemos el voltaje del LED cuando esta prendido y asumimos

$$V_{CE} = +0.2(V)$$

Entonces tenemos que

$$\begin{aligned} +5(V) &= I_C R_C + V_{LED} + V_{CE(SAT)} \\ +5(V) &= I_C R_C + 1.8(V) + 0.2(V) \end{aligned}$$

Sabemos que el nivel máximo de corriente del LED es 35mA pero usar esta corriente a frecuencias mayores haciendo que se prenda y se apague dará paso a distorsión. Por esto se usará un nivel de corriente menor, alrededor de 20mA.

Reemplazando este valor en la ecuación tenemos

$$\begin{aligned} +5(V) &= 20(mA)R_C + 1.8(V) + 0.2(V) \\ R_C &= \frac{5(V) - 1.8(V) - 0.2(V)}{20(mA)} \\ R_C &= 150(\Omega) \end{aligned}$$

Este circuito funciona muy bien pero al encender y apagar el circuito del LED podría haber rizos en la fuente de voltaje debido a las variaciones de corriente que podrían inducir ruido a circuitos adyacentes conectados al circuito manejador del LED.

Manejar el LED con un circuito push/pull que pueda desviar la corriente cuando la señal quiera que el LED no se encienda disminuirá los rizos en la fuente de poder.

Para este circuito push/pull la señal digital pasará por un buffer para ser aislada un poco, después entrará en el circuito para modular el LED, se tendrá un arreglo entre el LED y un transistor de manera que cuando la señal sea un alto el transistor entre a zona de corte y toda la corriente pase por el LED. Cuando la señal empieza a caer hacia el nivel bajo en cierto punto de esta caída, parte de la corriente empezara a ser desviada a otra parte para que la caída no sea tan abrupta. A medida que sigue bajando el nivel la corriente va saturando al transistor para que el voltaje colector emisor sea cero y no exista corriente en el LED. Todo esto pasa en los tiempos de subida y bajada de la

señal. Para el circuito se tiene que utilizar un transistor PNP ya que con un NPN no se obtendría el mismo efecto. Se escogió el 2N3906 por ser un equivalente al 2N3904 en PNP y además también muy fácil de encontrar en el mercado local.

### 3.3.3. Descripción funcional.

De igual manera la descripción funcional del circuito la vamos a dividir en dos partes: análoga y digital.

#### *Circuito analógico.*

Como se menciono anteriormente el circuito principal es el manejador del LED. El circuito que se describe a continuación se encuentra en la sección de apéndices con el titulo de TRANSMISOR ANALOGICO. Cuando una señal analógica es alimentada a la base del transistor **Q1**, el componente AC de la señal cambia la corriente de la base del transistor y subsecuentemente la intensidad de la luz del LED **D1** a medida que la amplitud varia. **Q1** controla la cantidad de corriente que fluye a través del LED **D1** en respuesta a cambios en la corriente aplicada a la base del transistor. Los resistores **R7** y **R8** forman un divisor de

voltaje que polariza **Q1** a la mitad de la fuente de voltaje y pone el rango operacional. Esto pone aproximadamente 3.8 voltios en el emisor y con el resistor **R9**, la corriente del LED **D1** se establece en 17mA.

Una señal digital conmutará al transistor **Q1** entre encendido y apagado a medida que la señal cambie de un alto a un bajo. Mientras **Q1** se enciende y se apaga, **D1** también se encenderá y se apagará. Cuando la señal digital es un bajo, a 0 voltios, el transistor **Q1** entra en zona de corte y actúa como un conmutador abierto. Como no fluye corriente por el colector, **D1** esta apagado. Cuando la señal cambia a estado alto, a aproximadamente 9 voltios. El transistor se satura y polariza directamente a las junturas base-emisor y base colector. Esto permite que la corriente del colector fluya y que **D1** emita luz.

Una señal analógica externa puede ser aplicada a través del terminal **ANALOG IN**. La señal externa es acoplada a través del capacitor **C5** que bloquea niveles DC y después excita **Q1** como se describió anteriormente.

Una señal proveniente de un micrófono de tipo electret puede ser acoplada al circuito, esta señal debe ser amplificada ya que los niveles son demasiado bajos.

La voz produce vibraciones acústicas que son detectadas por un micrófono que contiene una membrana sensitiva. El micrófono y **R1** forman un divisor de voltaje.

Cuando no hay voz, el micrófono actúa como un resistor pasivo, resultando en un voltaje a través del micrófono de más o menos ocho voltios. Cuando sonido es detectado por el micrófono, su resistencia (y voltaje a través de él) cambiara proporcionalmente a la amplitud y la frecuencia de la señal fuente.

El amplificador operacional LM741 **U1** es usado en la configuración no inversora como amplificador. Después que la señal de voz pasa por el capacitor **C1** esta ya no tendrá niveles DC y es enviada a la entrada no inversora del amplificador operacional. Esta entrada esta puesta a la mitad del voltaje de alimentación del circuito mediante los resistores **R2** y **R3** que actúan como un divisor de voltaje.

Este nivel DC aparecerá en la salida con la señal de voz superpuesta. La ganancia del amplificador está puesta a 100 debido a los resistores **R4** y **R12**. El capacitor **C2** actúa como filtro para señales de frecuencias bajas. El capacitor **C3** es un capacitor de bypass usado para remover cualquier ruido o transientes que pudieran ocurrir en la fuente de poder.

El circuito tiene también una parte digital que contiene un pequeño oscilador y un terminal para inyectar señales digitales externas.

Para esta parte se usó un circuito integrado CMOS de 4 puertas lógicas NAND de dos entradas, las entradas de las puertas lógicas tienen entradas con histéresis (SCHMITT TRIGGER). Al tener estas entradas, la entrada de voltaje hará que la compuerta conmute de un bajo a un alto a un nivel más alto del que una compuerta normal lo haría. Esta característica añade inmunidad al ruido a la compuerta en el caso de señales con tiempos de subida y bajada lentos.

El oscilador digital usa dos compuertas, la a y la d, del integrado **U2** como un oscilador de relajación de 10HZ. El oscilador es habilitado o deshabilitado dependiendo del conmutador **SW4**. Cuando el oscilador esta encendido, los pines 2 y 13 son llevados a un alto lógico. Las compuertas a y d actúan como inversores convencionales con los pines 1, 11 y 12 respondiendo al circuito de tiempo del oscilador formado por **R5**, **R6** y **C4**. Mientras una de las entradas de la compuerta NAND este en alto, la salida será un alto. Sin embargo, cuando las dos entradas son un alto, la salida será un nivel lógico bajo.

Cuando el oscilador es alimentado por primera vez, asumamos que el pin 11 esta en bajo. Esto hará que el capacitor **C4** se empiece a cargar a través del resistor **R6** a una tasa determinada por la constante de tiempo RC. Por consiguiente, los pines 3 y 12 deben estar en alto, el pin 1 debe estar en bajo. Cuando la carga de **C4** llega a la mitad del voltaje de la fuente de alimentación, el pin 1 de la compuerta se va a alto, causando que su salida conmute a un bajo lógico. La compuerta d ahora cambia de bajo a alto, y **C4** comienza a cargarse a la polaridad opuesta. El voltaje

en el pin 1 comienza a decrecer hasta llegar a un nivel reconocido como bajo. El ciclo se repite indefinidamente y una onda cuadrada aparece en el pin 11.

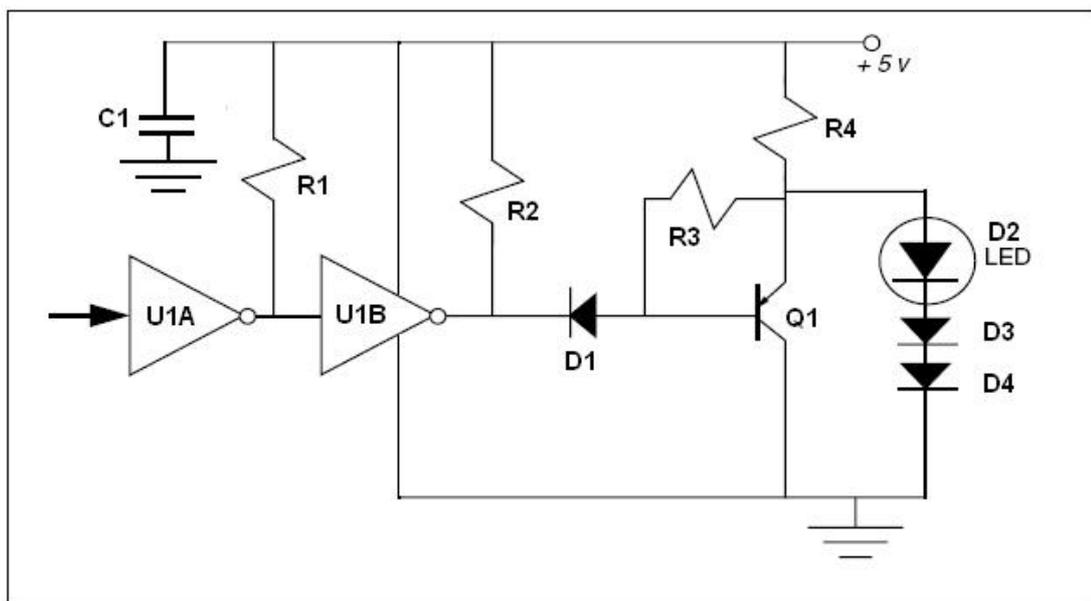
Cuando el oscilador este deshabilitado el pin 11 cambiara a alto y esto permitirá que la señal digital entre por el pin 6 de la compuerta **U2b** que después será invertida por **U2c** para que recupere su estado original.

Cualquiera de las dos opciones que se escoja será aplicada a la base de **Q1** al mover **SW3**.

#### *Circuito digital.*

La señal digital que entra en **U1** puede llegar con niveles un poco bajos, por esto se utiliza las compuertas a y b del circuito integrado como buffer, el integrado es un inversor con salidas de colector abierto TTL 74LS05. Después de esta etapa se tiene un arreglo entre transistor y diodos a manera de push/pull, esto quiere decir que cuando el diodo este prendido el transistor estará en corte hasta que cambie el voltaje en la entrada y la corriente que pase por el diodo lentamente empiece a disminuir al desviarse a otro lado y

hasta llegar a un punto en el que el transistor se encienda, y el diodo deje de funcionar. Asumamos que se tiene un estado alto a la salida del pin 4 de **U1**, el diodo **D1** tendrá +5 voltios en su cátodo y un voltaje menor a +5 voltios en su ánodo; esto polarizará al diodo inversamente y lo hace ver como un circuito abierto.



**Figura 3.9. Diagrama esquemático del circuito digital.**

La corriente que atraviesa a **R4** querrá buscar un camino a tierra y lo hará a través de **R3**, **Q1** y **D2**. La corriente que fluye por **R3** polarizará inversamente la unión base-colector

de **Q1**, esto llevará a estado de corte al transistor. Con **Q1** en corte el único camino para la corriente que queda es el de **D2** y es esta corriente la que lo polariza y enciende el LED. El voltaje de emisor de **Q1** cuando **D2** esta encendido es la suma de los voltajes de **D2**, **D3** y **D4**, aproximadamente +3.2 voltios. Una vez que la salida en el pin 4 de **U1** cambie de alto a bajo la corriente en **D2** debe ir cambiando poco a poco para evitar rizados en la fuente de voltaje. Para entender como hacemos esto, supongamos que la transición entre alto y bajo en el pin 4 de **U1** es algo lenta. **D1** se enciende una vez que el voltaje entre el emisor y el pin 4 de **U1** es mayor a +0.7 voltios, cuando esto ocurre empieza a fluir corriente a través del diodo **D1** y la corriente en **D2** empieza a disminuir ya que la corriente que fluye por **R4** no cambia debido a que el voltaje de **R4** no cambia mucho mientras los LED **D2**, **D3** y **D4** sigan encendidos, y por la ley de corriente de Kirchoff  $I_{R4} = I_{D1} + I_{D2}$ . Entonces a medida que el voltaje esta cambiando de nivel bajo a alto la corriente de **R3** aumenta hasta que fija un voltaje de +0.7 voltios entre la unión emisor-base de **Q1**. Una vez que esto suceda **Q1** estará encendido y la corriente de **R3** se quedará fija. A medida que sigue bajando el voltaje en el

pin 4 de **U1** la corriente de la base de **Q1** se incrementa y así mismo la corriente de emisor. Como la corriente de **R3** esta fija y la de emisor de **Q1** aumenta, la de **D2** debe bajar hasta el punto en que este se apague.

Este proceso al volver a cambiar de bajo a alto se repite al revés. Con esto hemos conseguido que la corriente de la fuente no cambie abruptamente y que no ocurran rizados en el voltaje de polarización que puedan afectar el funcionamiento de circuitos externos al transmisor óptico.

### **3.4. Implementación del módulo de recepción de fibra óptica.**

El propósito del receptor en los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, es extraer la información contenida en una portadora óptica que incide en el fotodetector. En los sistemas de transmisión analógica el receptor debe amplificar la salida del fotodetector y después demodularla para obtener la información. En los sistemas de transmisión digital el receptor debe producir una secuencia de pulsos eléctricos que contienen la información del mensaje transmitido.

El fotodetector convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica. La potencia óptica se encuentra en banda base, es decir, varía de acuerdo a la modulación y no a la frecuencia óptica. La corriente eléctrica que proporciona el fotodetector es muy débil, por lo que debe de amplificarse.

#### **3.4.1. Generalidades y diagrama de bloques.**

En los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, el fotodetector es un elemento esencial, su importancia impone que satisfaga requerimientos muy estrictos en su funcionamiento. Las características principales que deben tener son:

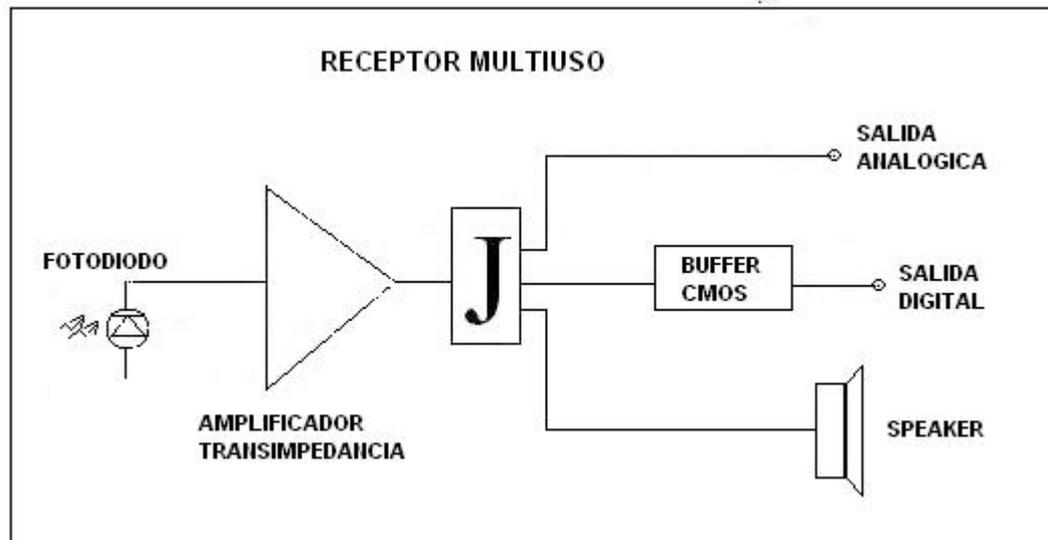
1. Sensibilidad alta a la longitud de onda de operación
2. Contribución mínima al ruido total del receptor
3. Ancho de banda grande
4. Características estables respecto al medio ambiente
5. Dimensiones físicas compatibles con la fibra óptica

Existen básicamente dos tipos de fotodetectores de semiconductor, que se emplean en los receptores ópticos para sistemas de telecomunicaciones. El primero es comúnmente referido como fotodiodo PIN, este genera un solo par electrón-hueco por fotón

absorbido. El segundo se refiere como fotodiodo de avalancha (APD), el cual presenta ganancia interna y genera más de una par electrón-hueco, debido al proceso de ionización de impacto, este proceso se llama ganancia de avalancha.

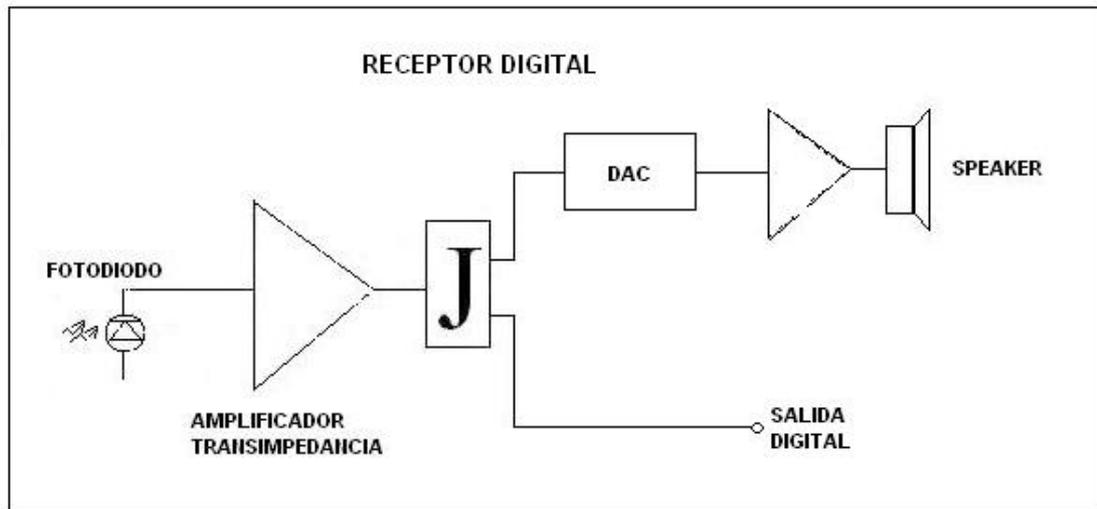
Al igual que en el caso del transmisor, tenemos dos diagramas de bloques, uno para un receptor analógico y otro para un receptor digital.

En el receptor analógico tenemos un fotodiodo con un amplificador de transimpedancia y después se selecciona la salida a través de un jumper representado como un bloque con una letra J. Si se usan señales digitales, esta señal pasa a un buffer CMOS. Si la señal es analógica puede ser vista en un punto de prueba o se la puede conectar a un altavoz.



**Figura 3.10 Diagrama de bloques general del receptor.**

En el receptor digital también tenemos el fotodiodo acoplado a un amplificador de transimpedancia que puede ir a un convertidor digital/analógico y de ahí a un altavoz o por otro lado la señal puede ser usada en su formato digital.



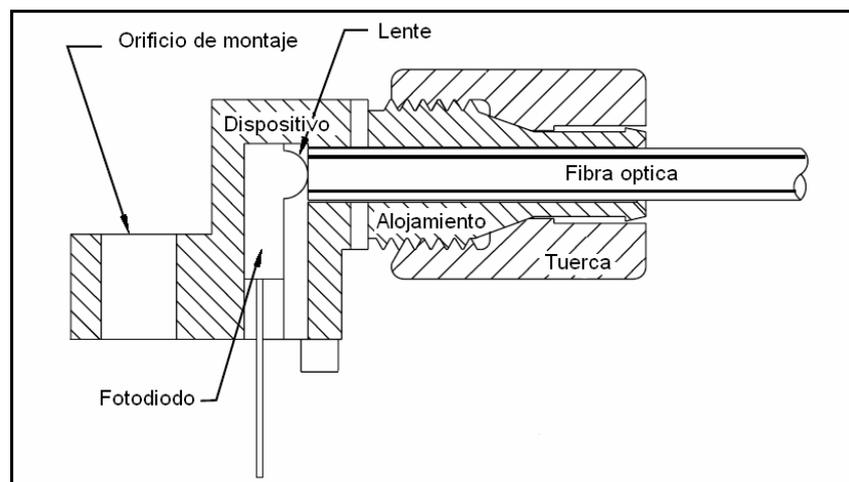
**Figura 3.11. Diagrama de bloques del receptor digital.**

### **3.4.2. Esquema, consideraciones del diseño y dispositivos utilizados.**

El primer punto que se debe considerar es la atenuación y el ancho de banda que tiene el medio de transmisión que vamos a utilizar. Para esta implementación se uso fibra óptica de plástico SUPER ESKA™ hecha con resina de PMMA de 1mm de diámetro de la compañía MITSUBISHI RAYON Co., Ltd. la cual tiene un ancho de banda de aproximadamente 40 MHz y una perdida de 0.15 dB/m @ 660 nm y es de índice escalonado. El dispositivo fotodetector que se utiliza en esta aplicación es un fotodiodo

PIN IF-D91 de la compañía INDUSTRIAL FIBER OPTICS Inc. el cual tiene una respuesta óptica que va desde 400 a 1100 nm.

El empaquetamiento del dispositivo tiene entre sus características un micro lente interno y un alojamiento de precisión hecho con PBT moldeado al dispositivo semiconductor con un orificio para que la fibra pueda ser fijada con una tuerca de aseguramiento una vez que el extremo de la fibra tope el micro lente; así de esta manera la mayoría de la luz emitida por el LED será acoplada a la fibra.



**Figura 3.12. Corte transversal del fotodiodo en su alojamiento de PBT.**

El IF-D91 tiene una respuesta de  $0.2 \mu\text{A}/\mu\text{W}$  @ 632 nm., una corriente de oscuridad de 60 nA y su rango de temperatura esta entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .

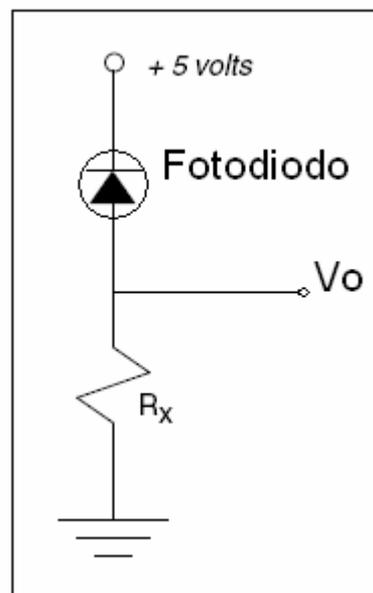
### *Circuito analógico*

La mayor parte de las aplicaciones de los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica se centran en la transmisión de señales digitales. Sin embargo, cada día es mas frecuente la utilización de la fibra óptica en sistemas de telecomunicaciones analógicos. La razón se debe, a las características que presenta la fibra óptica, así como el progreso en la fabricación de dispositivos ópticos que ah trascendido en la linealidad y estabilidad de sus características.

Como ya es conocido, la mayoría de señales electrónicas aparecen mas como voltajes que como corrientes. De esta manera necesitamos un amplificador que nos convierta corriente a voltaje. Un amplificador con este tipo de función de transferencia son llamados amplificadores de transimpedancia. El amplificador de transimpedancia

probablemente es el elemento más sensible en todo el sistema de fibra óptica.

El dispositivo de transimpedancia más simple es una resistencia. Su salida es medida en voltios por amperio. Tenemos por ejemplo el siguiente circuito.



**Figura 3.13. Red de transimpedancia básica.**

Entonces tenemos que  $V_o = P_i \cdot \mathfrak{R} \cdot R_x$

Donde

$P_i$  Es la potencia óptica incidente en el fotodiodo.

$\mathfrak{R}$  Es la respuesta del fotodetector.

$R_x$  Es el valor de la resistencia en ohmios.

El resistor de transimpedancia usado como un receptor de fibra óptica tiene dos inconvenientes. Primero, la impedancia de la carga debe ser alta comparada con  $R_x$ , o la ganancia del receptor caerá. Segundo, la capacitancia de la carga afecta el ancho de banda del circuito como se puede ver en la ecuación

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_x (C_d + C_r + C_l)}$$

(3.1.)

Donde

$R_x$  Es el valor del resistor en ohms

$C_d$  es la capacitancia del foto detector

$C_r$  Es la capacitancia del resistor

$C_l$  Es la capacitancia de la carga

Afortunadamente hay receptores ópticos mucho mejor que el fotodiodo y el resistor. Un ejemplo es el diseño con un amplificador operacional. Su principal ventaja es que el amplificador operacional provee aislamiento entre la impedancia de carga y el resistor de ganancia de transimpedancia.

Sabemos que la mínima corriente que entrega el IF-D91 es 60nA. Por otro lado supongamos que tenemos un LED rojo que nos esta enviando 200  $\mu\text{W}$  por fibra plástica SH4001 de 0.15dB/m, esa potencia corresponde a 20mA; en 20m tendremos una atenuación de 3dB y la potencia óptica que tendríamos seria 100  $\mu\text{W}$  que el IF-D91 con su respuesta de 0.2  $\mu\text{A}/\mu\text{W}$  convertiría en

$$I_{PD} = P_i \cdot \mathfrak{R}$$

$$I_{PD} = 100(\mu\text{W}) \cdot 0.2\left(\frac{\mu\text{A}}{\mu\text{W}}\right) = 20\mu\text{A}$$

Entonces ahora tenemos dos valores 60 nA y 20  $\mu\text{A}$ , para saber que nivel de amplificación necesitamos se debe fijar un valor en voltaje a la salida del amplificador para poder

dimensionar un resistor, además se debe considerar que el amplificador operacional estará alimentado con 0 y +9(V). Con esto sabemos que al amplificar la señal no podemos pasar de +9(V) porque la señal se recortaría y además que se debe añadir un nivel de corriente continua para que la señal tampoco recorte los ciclos negativos. Consideremos una señal pequeña que varíe entre 0.8  $\mu\text{A}$  y 1.2  $\mu\text{A}$ , si queremos que el voltaje en la salida este en 2 Vpp entonces:

$$1(V) = 1.2(\mu\text{A}) \cdot R_g$$
$$R_g = 833(K\Omega)$$

El potenciómetro que más se le acerca es uno de 100 k $\Omega$ .

### *Circuito Digital*

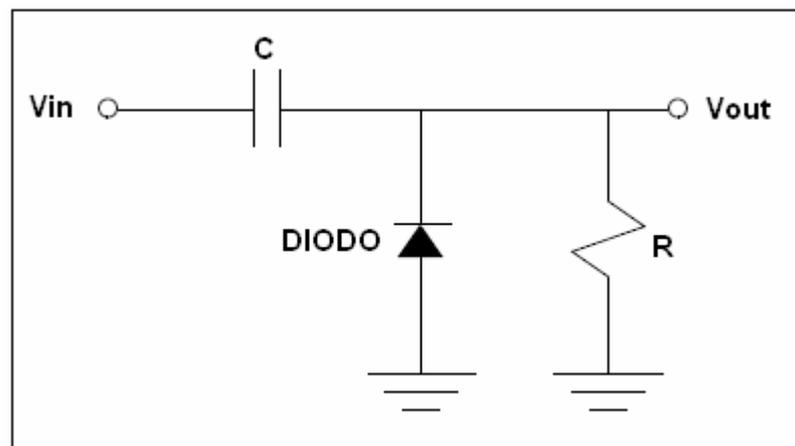
Este tipo de receptores consiste básicamente en un fotodiodo y una cadena de amplificación. La potencia que incide en el fotodiodo se convierte en señal eléctrica, la cual se amplifica para generar una señal de nivel suficientemente grande para que pueda ser manejada por los circuitos subsecuentes.

El receptor óptico debe tener la máxima sensibilidad posible, el mayor intervalo dinámico, respuesta amplitud-frecuencia plana e introducir el mínimo de interferencia.

A pesar que los amplificadores operacionales están listos y son fácil de usar, a veces no cuentan con el ancho de banda deseado para ciertas aplicaciones. Para estas aplicaciones, los transistores discretos son la respuesta.

Para receptores digitales comúnmente se usa amplificadores que tienen el fotodiodo acoplado a la base de un transistor en configuración emisor común y en la siguiente etapa un transistor en configuración colector común con una resistencia de retroalimentación a la primera etapa. La primera etapa determina la ganancia de voltaje ya que la segunda etapa tiene una ganancia aproximada a la unidad. El valor del resistor de retroalimentación se determina de acuerdo a un compromiso entre el ruido, ancho de banda y transimpedancia.

La salida del amplificador será invertida y con un nivel de corriente continua, para quitar el nivel DC se acopla un capacitor y un circuito cambiador de nivel hecho con un diodo y un resistor.



**Figura 3.14. Cambiador de nivel.**

Y se utilizara un circuito TTL a fin de que invierta la señal y también de formato TTL a la salida.

### **3.4.3. Descripción funcional.**

#### *Circuito analógico*

El circuito que se describe a continuación se encuentra en los apéndices con el título de RECEPTOR ANALOGICO.

La señal óptica es acoplada al fotodiodo IF-D91 que convierte los fotones emanados por la fibra óptica a corriente. El fotodiodo se comportara de dos maneras dependiendo si es iluminado o si no recibe luz alguna. Cuando el fotodiodo no recibe luz alguna, es un diodo inversamente polarizado y esencialmente un circuito abierto. Cuando fotones empiezan a llegar al fotodiodo, los electrones empezaran a fluir a través de la unión p-n. Este flujo de corriente hace ver al fotodiodo como una fuente de corriente con una gran impedancia y con una pequeña corriente (rango de microamperios) que es proporcional a la cantidad de intensidad de luz que incide en el fotodiodo.

El amplificador operacional **U1** esta configurado para actuar como un amplificador de transimpedancia y convierte la corriente del fotodiodo en voltaje. La corriente del fotodiodo fluye hacia la entrada inversora de **U1** a través del pin 2, que en este circuito es una tierra virtual.

Cuando el fotodiodo no tiene luz que incida en el no fluye corriente. El voltaje en el pin 3 es determinado por el divisor de voltaje formado por **R1** y **R2** y es definido como:

$$V_{pin3} = \frac{R_2 \cdot (+9)}{R_1 + R_2}$$

Cuando la luz incide en el fotodiodo, se genera internamente corriente. Esta corriente fluye fuera del ánodo y dentro del cátodo del fotodiodo. Debido a que el pin 2 de **U1** es una tierra virtual no puede haber corriente que fluya al pin 2. La corriente del fotodiodo fluye por **R3** y causa un incremento de voltaje igual a **R3** veces la corriente del fotodiodo.

Los amplificadores operacionales hacen lo que sea posible para que la diferencia de voltaje entre sus entradas sea cero. De esta manera, **U1** quiere que el voltaje en el pin 2 sea el mismo que en el pin 3, y como no hay corriente a través del fotodiodo, el voltaje en el pin 6 es el mismo que el del pin 3. Esto significa que no hay corriente circulando por **R3**.

Ahora analicemos el caso cuando el fotodiodo recibe luz de la fibra óptica. Cuando la luz entra en el fotodiodo, una

corriente fluye por el mismo. La corriente que fluye por el fotodiodo es extremadamente pequeña comparada con la corriente que fluye por **R1** y **R2**, esto quiere decir que el voltaje no cambiará en el pin 3 de **U1**. Pero ahora, la corriente esta fluyendo desde el pin 2 y el voltaje en el pin 2 empieza a caer, resultando en una diferencia de voltaje en las entradas de **U1**.

**U1** manda la misma cantidad de corriente a través de **R3** en compensación.

El voltaje en la salida estaría definido como:

$$V_{pin6} = \frac{R_2 \cdot (+9)}{R_1 + R_2} + I_{PD} \cdot R_3$$

El potenciómetro **R3** controla la ganancia del amplificador **U1**. **C3** es un filtro pasa-bajos que crea retroalimentación para estabilidad de frecuencia. El capacitor **C1** es un bypass DC usado para remover cualquier ruido o transiente proveniente de la fuente de poder.

Si el conmutador **SW2** es puesto en la posición del circuito digital, el voltaje de **U1** ira directo a el pin 2 de **U2A**. La compuerta a tiene conectado el pin 2 a **R4** que subirá el nivel de voltaje de la entrada, y el pin 1 a +9 voltios. La salida es invertida para tener la salida original. Esta salida encenderá el diodo **D1** a través de la resistencia **R5**, se tiene también el Terminal de salida digital que puede ser apreciado con un osciloscopio.

#### *Circuito digital.*

El circuito se encuentra en los apéndices con el titulo de RECEPTOR DIGITAL.

El receptor digital consta del fotodiodo **D1** acoplado a la base del transistor **Q1** que esta en configuración emisor común, la salida invertida pasa a la base de **Q2** que está en configuración colector común y en la salida del emisor de **Q2** tiene un resistor acoplado a la base de **Q1** que da origen a un camino de retroalimentación negativa.

Para entender el funcionamiento del circuito asumamos que **D1** no recibe luz de la fibra y que el resistor de

retroalimentación **R4** no esta en el circuito. Si **D1** no recibe luz, se crea una corriente extremadamente pequeña que la podemos aproximar a cero. Si **Q1** no tiene corriente en la base entra en zona de corte. Con **Q1** en estado de corte, la corriente que pasa por **R1** enciende a **Q2** y fija un voltaje en el emisor de **Q2**. Ahora pongamos a **R4** en su posición. Una pequeña parte de la corriente que fluye por **R3** empieza a fluir por **R4** llegando a la base de **Q1**, esta corriente es suficiente para encenderlos. Con **Q1** encendido, ahora existe corriente en el colector de **Q1**, lo que hace que la corriente de la base de **Q2** disminuya haciendo por ende que el voltaje en el emisor de **Q2** también se disminuya debido a que la corriente que fluye por la resistencia **R3** disminuyo. De esta manera lo mismo sucede cuando la luz incide en el fotodiodo **D1**. Esta corriente enciende **Q1**, al ser esta corriente mayor que la corriente cuando **D1** no recibe luz, la corriente en la base de **Q2** será menor, así como el voltaje en **R3**. Algo de esperarse ya que en configuración emisor común la salida esta desfasada 180°, de igual manera **R4** actúa como camino de retroalimentación. **R4** es variable ya que si la corriente que fluye por el es pequeña la ganancia de la señal es mayor, mientras que cuando mayor

corriente entra a la base de **Q1** el voltaje que se tendrá en **R3** no tendrá mucha amplitud de pico a pico.

La salida del emisor de Q2 es enviada a un circuito cambiador de nivel formado por D2, C1 y R5, que pondrá la salida a un nivel que pueda ser aceptado como entrada al inversor TTL 74LS05. La salida será igual a la fuente ya que el circuito formado por **Q1** y **Q2** la desfasó 180 grados. **U2** es un regulador de voltaje con un voltaje de salida fijo en +5 voltios que se encarga de dar la alimentación al TTL 74LS05. **C2** se encarga de eliminar posibles rizados y de dar estabilidad a la salida de +5 voltios.

### **3.5. Elementos de interconexión y herramientas ópticas.**

El cable de fibra óptica cumple funciones similares al cable de cobre y los conectores son usados de manera similar para acoplar la fibra a diferentes dispositivos de un sistema de fibra óptica. Aquí se mencionarán diferentes métodos de conexiones y herramientas usadas con componentes de fibra óptica.

En sistemas electrónicos, la corriente eléctrica es usada ya sea para transmitir potencia o para llevar información a través de

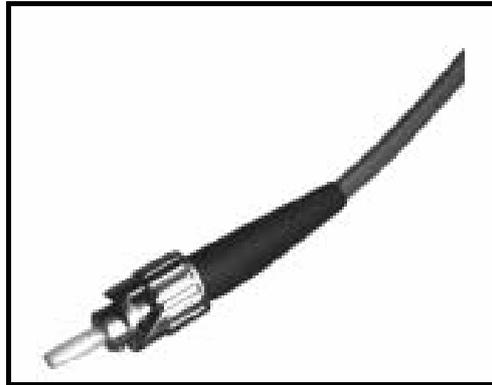
componentes y subsistemas. Los sistemas de fibra óptica usan la energía óptica primeramente para llevar la información o datos. Tres acciones fundamentales son llevadas a cabo a través de varios componentes y subsistemas. Un componente emite energía óptica (LED y láseres), transfiriendo energía óptica (el cable de fibra óptica y sus acoples) y recibiendo la energía óptica (los fototransistores y los fotodiodos)

Para acoplar estos componentes de la fibra óptica y para que la energía óptica pueda ser transmitida dentro del sistema, dos principales métodos son empleados.

- Conectores
- Empalmes

### **3.5.1. Conectores.**

Los conectores más a menudo son usados para acoplar la fibra óptica a los fotodetectores o LED.



**Figura 3.15. Conector de fibra ST con cable de fibra óptica.**

Los dispositivos son empaquetados en una cubierta que acepta al cable de fibra óptica conectado, permitiendo una transferencia eficiente de la energía óptica entre el cable y el componente opto-electrónico.

En muchos sistemas electrónicos, la habilidad para aumentar, cambiar o remover componentes o subsistemas es una necesidad. Las razones suelen ser expansiones de equipos, reparaciones o actualizaciones. Los conectores eléctricos son parte crucial en la ejecución de este tipo de actividades con un mínimo de trabajo y tiempo, permitiendo un rápido intercambio de componentes que posean el mismo tipo de conector. Un ejemplo cotidiano de un conector eléctrico es el cable de poder usado en varias

aplicaciones. Existiría bastante incomodidad el tener que permanentemente atar los cables de conexión a la toma de energía cada vez y cuando se desee encender algún dispositivo en el hogar. De esta manera se puede comprender las conveniencias que puede proveer un conector eléctrico. Hay una fuerte necesidad de conectores en la fibra óptica por las mismas razones. Algunas de las ventajas de un conector son:

- Bajas pérdidas.
- Fácil instalación.
- Repetibilidad (Bajas variaciones en pérdidas después de desconexiones).
- Consistencia (Entre conectores).
- Económicos

Hay variedad de conectores de fibra, lo cual incluye SMA, SC, ST, FDDI, Bicónicos y DNP simples. Cada tipo de conector tiene una característica única que provee de ventajas dependiendo de la aplicación. Un conector ST está construido con una férula cilíndrica acompañada de un receptáculo que sirve de acople. La parte externa del

conector es un sócalo tipo bayoneta con resorte que permite un rápido empate con el receptáculo de acople. Los conectores ST son populares en las comunicaciones de datos y aplicaciones a medias distancias.

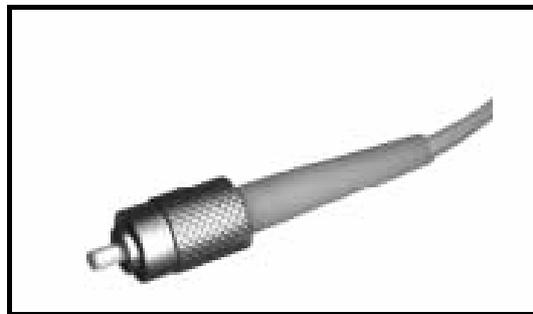
Sin importar el tipo, todos los conectores comparten atributos comunes de diseño. El conector se compone de un casquillo o férula, un cuerpo, una cápsula o corona y un manguito descargador de tensión.

El casquillo es la porción central del conector que de hecho contiene la fibra óptica. Puede estar fabricado en cerámica, acero o plástico. Para la mayoría de los conectores, el casquillo cerámico ofrece las menores pérdidas por inserción y la mejor repetibilidad. La cápsula y el cuerpo pueden ser o de acero o de plástico. Para hacer una conexión, la cápsula se puede atornillar, cerrar girando o ajustar con un muelle. El manguito descargador libera de tensiones a la fibra óptica. Figuras 3.15 y 3.16 muestran varios tipos de conectores comúnmente usados en la industria de la fibra óptica.

La instalación de un conector a la fibra óptica es similar en concepto al ensamble de un conector eléctrico; sin embargo, el proceso requiere mayor cuidado, precisión y tiempo.

El objetivo de todo procedimiento de instalación de conector es fijar la fibra en una cápsula de protección.

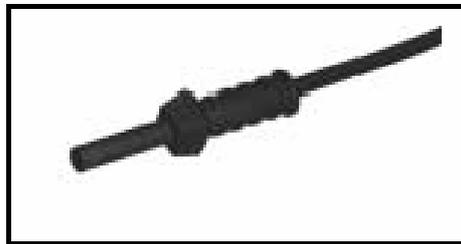
Siempre hay que asegurarse que la fibra esté alineada y proveerla de un acabado liso en su extremo para lograr una máxima eficiencia en la transmisión.



**Figura 3.16. Conector de fibra FC con fibra de vidrio instalada.**

Algunos conectores son diseñados para reducir algunos pasos durante el proceso requerido para una buena

instalación del conector. Un ejemplo de lo señalado se puede encontrar en el conector DNP. Es un conector de bajo costo para acoples en fibras ópticas de plástico por debajo de los 30 metros de longitud y no usa ningún prensador para fijar la fibra al conector.



**Figura 3.17. Conector DNP simple con 1000  $\mu\text{m}$  de núcleo de fibra óptica de plástico.**

Otros diseños de acoples para cables de fibra óptica y componentes de sistemas utilizan conectores. Existen conectores que poseen en su cuerpo o cápsula ya sea el LED o el fotodetector. Estos LED y fotodetectores están dentro del cuerpo del conector el cual aloja directamente la fibra.

La construcción interna del conector alinea con gran precisión la fibra con el fotodetector o el LED de tal forma que exista la máxima transferencia de energía óptica. Este tipo de conector se lo ve con frecuencia en el empleo de fibras ópticas de plástico.

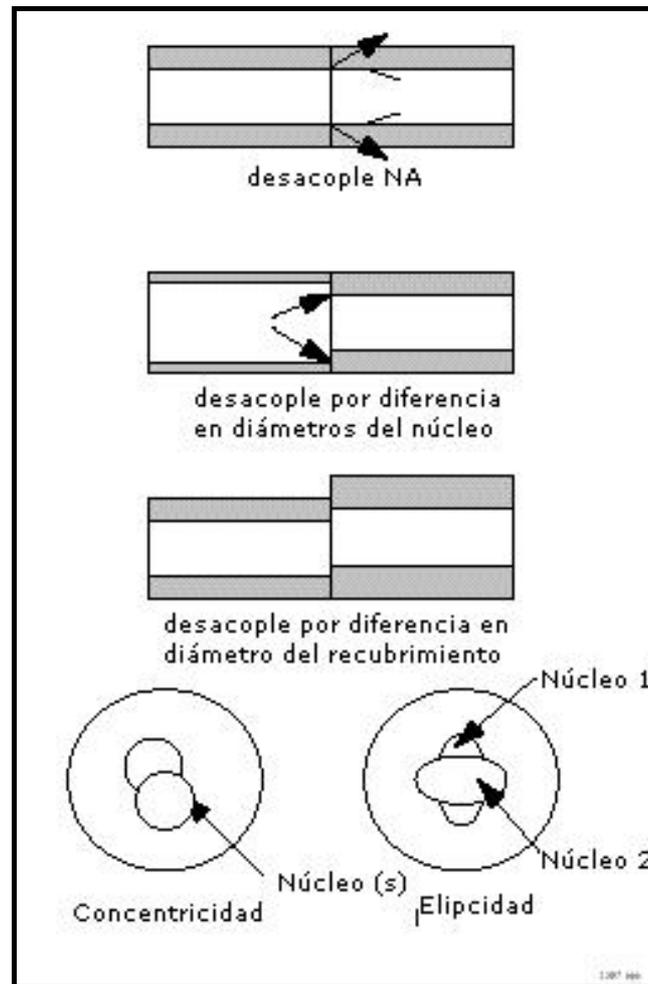
Todos los conectores tienen cierta atenuación o pérdidas de energía óptica en su interior al ser instaladas. Hay varias causas que originan esta atenuación. Algunas son atribuidas a los alineamientos mecánicos a los que está sometida la fibra y otras a la calidad que se le da al acabado en los extremos. Como ejemplo: Dos cables de fibra al unirse uno con otro a través de un conector. Si el acabado que se le da al extremo de uno de los cables no posee una correcta alineación con el área del núcleo del otro cable y no logra darse un correcto acople entre ambas áreas, esto traerá como consecuencia la pérdida de luz en las regiones de los núcleos no superpuestas. Cualquier inclinación en los ejes de los extremos de las fibras haría que la luz se pierda en los límites de sus respectivos ángulos de acoplamiento. En fibras con pobres acabados, la luz será absorbida, reflejada

o dispersada por las irregularidades existentes en los extremos.

Las pérdidas en una interconexión de fibra óptica pueden separarse en dos categorías:

*Intrínsecas.*

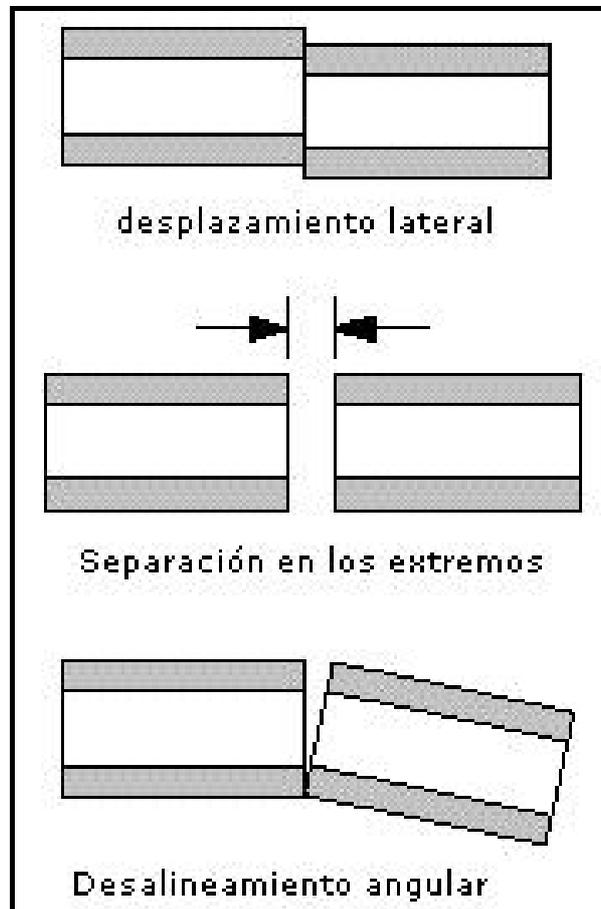
Pérdidas causadas por variaciones en la fibra como tal, como desacoples en la apertura numérica, concentricidad y desacoples entre núcleo y recubrimiento.



**Figura 3.18. Pérdidas Intrínsecas en las fibras ópticas.**

*Extrínsecas.*

Factores que son referidos a la interfase. Las principales causas de estas pérdidas son desplazamiento lateral, separaciones en los extremos, desalineación angular y asperezas en la superficie.



**Figura 3.19. Pérdidas extrínsecas en las fibras ópticas.**

### **3.5.2. Empalmes.**

El empalme de fibra óptica es la técnica que se utiliza para unir permanentemente dos fibras ópticas en una conexión de bajas pérdidas. Esta conexión se puede realizar usando uno de estos dos métodos: empalme por fusión o empalme mecánico.

El empalme por fusión proporciona la conexión de pérdidas más bajas. Para realizar el empalme de la fibra esta técnica utiliza un dispositivo denominado empalmadora de fusión. La empalmadora de fusión alinea con precisión las dos fibras, generando un pequeño arco eléctrico para soldar las dos fibras.

Una buena empalmadora de fusión proporcionará empalmes consistentes, con bajas pérdidas, generalmente menores que 0,1 dB para fibras monomodo o multimodo. Sin embargo, tales empalmadoras son bastante caras y voluminosas y pueden ser difíciles de manejar.

El empalme mecánico es una técnica alternativa de empalmado que no requiere una empalmadora de fusión. Utiliza un pequeño empalme mecánico, aproximadamente de 6 cm. de largo y de 1 cm. De diámetro que une permanentemente las dos fibras ópticas. Un empalme mecánico es un conector de fibra pequeño que alinea dos fibras desnudas de manera precisa y que las asegura mecánicamente. Para amarrar permanentemente la unión

se utilizan cubiertas con resorte, cubiertas adhesivas o ambas. Hay disponibles empalmes mecánicos para fibras monomodo o multimodo, pero con mayores pérdidas por empalme que las del empalme por fusión. Son pequeños y fáciles de usar y convenientes para reparaciones rápidas o instalaciones permanentes. Las pérdidas de conexión de los empalmes mecánicos son mayores que las de los empalmes por fusión y están en el rango comprendido entre 0,1 y 0,8 dB.

Las fibras ópticas se pueden empalmar con una empalmadora de fusión o con una unión mecánica. Una vez terminado el empalme, se almacena en una caja de empalmes. Esta protege el empalme y las fibras expuestas, y proporciona si fuera requerido un medio de acceso al empalme. Para cables con un número pequeño de fibras y cuando se usa un cable de fibra óptica grueso con protección ajustada, se pueden instalar los conectores directamente en la fibra óptica del cable, sin necesidad de empalmar ni usar cajas de empalmes.

Las pérdidas en un empalme de fibra óptica son idénticas a las existentes en un conector - intrínsecos y extrínsecos-. Sin embargo, los métodos usados para hacer empalmes de fibra óptica producen tolerancias más reducidas y por ende bajas atenuaciones. Algunas fuentes de pérdidas son reducidas; otras son eliminadas.

<b>CONECTORES</b>	<b>EMPALMES</b>
Removibles	Permanentes
Pueden ser instalados en fábrica	Pueden ser instalados en campo
Pueden ser instalados en campo	Menor atenuación que los conectores
Fácil de reconfigurar	Ensambladura fuerte y compacta.
Provee una interface estandard	Bajo costo por conexión.
	Más fácil que calce en el interior da algún conducto.

**Tabla 3.1. Comparación entre conectores y empalmes para fibras ópticas.**

### **3.5.3. Herramientas especiales y equipos de medición.**

Algunas son las herramientas empleadas para el manejo, cuidados y mantenimientos requeridos en una fibra óptica.

Los medidores de potencia son pieza fundamental del equipamiento usado en las fibras óptica tanto como un voltímetro es usado en la electrónica. Los medidores de potencia miden energía óptica que sale de una fibra, de un transmisor, de un repetidor u otro componente opto electrónico usado en sistemas de fibra óptico. Usualmente son similares en apariencia a los voltímetros digitales usado en electrónica; sin embargo, miden potencia óptica en unidades de vatios o dBm. Los medidores de potencia consisten de un fotodetector (y de un conector apropiado) y un medio de lectura para medir la cantidad de corriente inducida por la luz por parte de un detector. Un medidor de potencia puede se usado para medir la cantidad total de potencia óptica viniendo de una fibra o transmisor, y cuando está apropiadamente configurada, la atenuación o las pérdidas a lo largo del cable de fibra y conectores.



**Figura 3.20. Medidor de Potencia Óptica con fuente de luz incluida.**

Para obtener la representación visual de las características de atenuación de una fibra óptica a lo largo de toda su longitud se utiliza un reflectómetro óptico en el dominio en tiempo (OTDR). El OTDR dibuja esta característica en su pantalla, de forma gráfica, mostrando las distancias sobre el eje X y la atenuación sobre el eje y. A través de esta pantalla se puede determinar información tal como la atenuación de la fibra, las pérdidas en los empalmes, las pérdidas en los conectores y la localización de anomalías.



**Figura 3.21. OTDR.**

El ensayo mediante el OTDR es el único método disponible para determinar la localización exacta de roturas de la fibra óptica en una instalación de cable óptico ya instalada y cuyo recubrimiento externo no presenta anomalías visibles. Es el mejor método para localizar pérdidas motivadas por empalmes individuales, por conectores, o por cualquier anomalía en puntos concretos de la instalación del sistema. Permite al técnico determinar si un empalme o unión está dentro de las especificaciones o si se requiere rehacerla. También proporciona una representación óptima de la integridad total de la fibra.

Cuando está operando, el OTDR envía un corto impulso de luz a través de la fibra y mide el tiempo requerido para que

los impulsos reflejados retornen de nuevo al OTDR. Las imperfecciones e impurezas de la fibra causan reflexiones a lo largo de la misma.

Conociendo el índice de refracción de la fibra óptica y el tiempo requerido para que lleguen las reflexiones, el OTDR calcula la distancia recorrida del impulso de la luz reflejada.

El OTDR mide también la potencia del impulso de luz reflejado y muestra en pantalla la atenuación de la fibra óptica en función de la distancia.

La instalación de un cable de fibra y de conectores requiere de herramientas especiales usadas sólo en fibras ópticas. A menudo estas herramientas son vendidas como equipamientos para una fibra en particular o algún tipo de conector. El escoger un conector diferente puede requerir herramientas adicionales. Las herramientas especiales más comúnmente encontradas en un equipamiento de herramientas para fibras ópticas incluyen:

- Removedor para retirar el revestimiento de un cable óptico.
- Tijeras removedoras para cortar las membranas de amortiguación.
- Herramientas de corte para fibras o cuchillas.
- Ponchadoras para acoples/empalmes con conectores de fibra.
- Materiales para pulir la fibra.
- Cautines.
- Gel Epóxico.
- Aceites para acoples/empalmes.
- Microscopio de inspección.

Una cuchilla para fibras es una de las herramientas más especiales para el manejo de las fibras. Su propósito es el cortar y separar la fibra de vidrio, obteniendo terminados limpios, perpendiculares sin irregularidades o daños. En su forma más simple una cuchilla consta de una hoja con filo para seccionar la fibra y un armazón para sostener la fibra bajo tensión antes de la separación.



**Figura 3.22. Ponchadora.**

Otra herramienta usada en las fibras ópticas incluye pequeños removedores de cubiertas, en este caso para el recubrimiento de la fibra, la cual posee hojas con filo para remover la cubierta de la fibra. Son usualmente diseñadas de tal modo que retiren el recubrimiento y en ningún momento limen la superficie del núcleo.

Además también son requeridas herramientas para pulir los extremos de la fibra. Una variedad de pulimentos están disponibles de tal forma que eliminen el efecto de la manipulación.

## **CAPITULO 4**

### **4. GUIA DOCUMENTADA PARA LAS PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE FIBRA OPTICA.**

La teoría debe ser comprobada con la experimentación. El experimento es la manera más eficiente para conocer características que a lo mejor con la teoría no se pueden apreciar mucho. Es necesario aclarar que muchos datos teóricos se alejan un poco de los reales ya que siempre existe el porcentaje de error debido a que nada es 100% exacto, es bueno manejar los valores con un +/- 10% de los valores esperados para poder detectar algún error, pero puede que se hallen valores que sobrepasen este margen.

Con los experimentos aparte de confirmar bases teóricas, también se adquiere experiencia y destreza en los diferentes ámbitos que se incluyen en el hecho de realizar prácticas.

En este capítulo se presentará una Guía de Laboratorio que está orientada a entregar al alumno conceptos, técnicas usuales y conocimientos básicos necesarios para el desarrollo de habilidades en el campo de sistemas de fibra óptica.

En consecuencia, para el logro de este objetivo se entregarán aspectos fundamentales de óptica, electrónica y conceptos básicos de semiconductores.

Algunos tópicos tratados no se han desarrollado con toda la formalidad matemática requerida, pues no es el objetivo de este compendio.

Dada la orientación específica de este trabajo no se pretende un estudio exhaustivo y acabado de cada uno de los temas tratados, puesto que solo se pretende preparar al alumno y facilitarle el desarrollo de las experiencias contempladas en un programa introductorio a sistemas de comunicaciones ópticas.

#### **4.1. GENERALIDADES Y OBJETIVOS DE LAS PRÁCTICAS.**

El manual es una parte integral del kit de entrenamiento para la transmisión de señales a través de fibra óptica, que será entregado en este proyecto de tesis.

El manual guiará a instructores y estudiantes a través de 11 prácticas de laboratorio. Cada práctica contiene una pequeña introducción teórica, detalle de objetivos, materiales que se usaran, procedimientos de los experimentos y una sección de análisis y preguntas.

A medida que se vaya avanzando con las actividades el alumno quedará cada vez más sorprendido con lo que constituyen los sistemas de fibra óptica, de hecho esta guía práctica es un muy buen complemento para reforzar conocimientos a los estudiantes de la materia Comunicaciones Ópticas. El alumno aprenderá que si bien la tecnología de fibra óptica no es nueva, contiene mucho de lo que ellos ya saben: electrónica y comunicaciones ópticas. La teoría de fibra óptica y su entendimiento gira entorno al estudio de la óptica clásica. Los transmisores y receptores son hechos de materiales semiconductores y tecnología, haciéndolos parte del estudio de electrónica. El currículum de este manual cubrirá estos

aspectos y tendrá interesado al estudiante al trabajar con los elementos físicos necesarios para acoplar fibra óptica.

Como se mencionó al principio de la tesis, unos de los principales objetivos a cumplir junto a la elaboración del Manual de Prácticas, era utilizar los instrumentos de medición ya existentes en los laboratorios de la universidad, así como el de optimizar los recursos económicos mediante el uso de una nueva tecnología -la fibra óptica plástica-. Una comparación de costos ha sido anexada en el apéndice 2 de este documento, con la cual se justifica el uso de la fibra óptica plástica y de todos los elementos de interconexión que a ella se asocian. Convirtiéndose así en una alternativa de transmisión más económica y válida para cumplir nuestros objetivos.

La fibra óptica plástica no solamente incurre en beneficios económicos por sí sola, los dispositivos semiconductores y los elementos de interconexión que se usan tienen características que permiten fácil diseño y operación, estas son ventajas frente a los sistemas de fibra óptica de vidrio ya que le facilita al estudiante la operación, instalación y ahorro de tiempo al momento de realizar alguna de las practicas.

Al final de estas actividades, el estudiante habrá ganado un mejor entendimiento de los sistemas de fibra óptica debido a que ya trabajó en ellos y ha adquirido una verdadera experiencia debido a la manipulación de los mismos. En la práctica de la vida real, los componentes pueden cambiar, pero los principios seguirán siendo los mismos.

#### **4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE ENTRENAMIENTO PARA LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA.**

El conjunto de experimentos a realizar son:

Practica # 1: Transmisión en el cable de fibra óptica y coeficientes de atenuación.

Practica # 2: Conectores y empalmes.

Practica # 3: Reflexión de Fresnel: Gel de acople de atenuación.

Practica # 4: Terminaciones en la fibra: Técnicas de pulido.

Practica # 5: Velocidad de los dispositivos opto-electrónicos.

Practica # 6: Transmisores de fibra óptica.

Practica # 7: Diseño de amplificadores de transimpedancia para receptores.

Practica # 8: La fibra óptica en sensores ópticos pasivos y activos.

Practica # 9: Inmunidad al EMI en la fibra óptica.

Practica # 10: Dispositivos de interconexión para la fibra óptica.

Conectores ST para fibra de plástico.

Practica # 11: Dispositivos de interconexión para la fibra óptica.

Empalmes.

Para referirse a la Guía Práctica documentada completa, referirse al anexo 2 de este documento.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **CONCLUSIONES:**

- Se demostró a través de la implementación final del sistema de transmisión/recepción sobre fibra óptica de plástico, la viabilidad y efectividad de comunicación sobre este medio de transmisión, con el diseño detallado en la presente tesis.
- Con la elaboración de la guía experimental documentada, se logró presentar una herramienta muy útil para que el estudiante universitario y el profesional, ponga en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en el campo de las comunicaciones ópticas.
- Luego del proceso de diseño, experimentación y medición de parámetros ocurridos durante la elaboración de este proyecto, se puede concluir que el comportamiento funcional de la fibra óptica de plástico es equivalente al de la fibra óptica de vidrio; y por lo tanto, fue válido utilizarla como referente en toda la elaboración de esta tesis como modelo experimental.

- Al concluir que los dos tipos de fibra óptica, tanto de vidrio como plástica, tienen igual comportamiento funcional, se ha optimizado recursos monetarios al elaborar una plataforma de pruebas utilizando los elementos menos costosos y que para cumplir los objetivos de diseño e implementación del kit de entrenamiento son los necesarios.

#### **RECOMENDACIONES:**

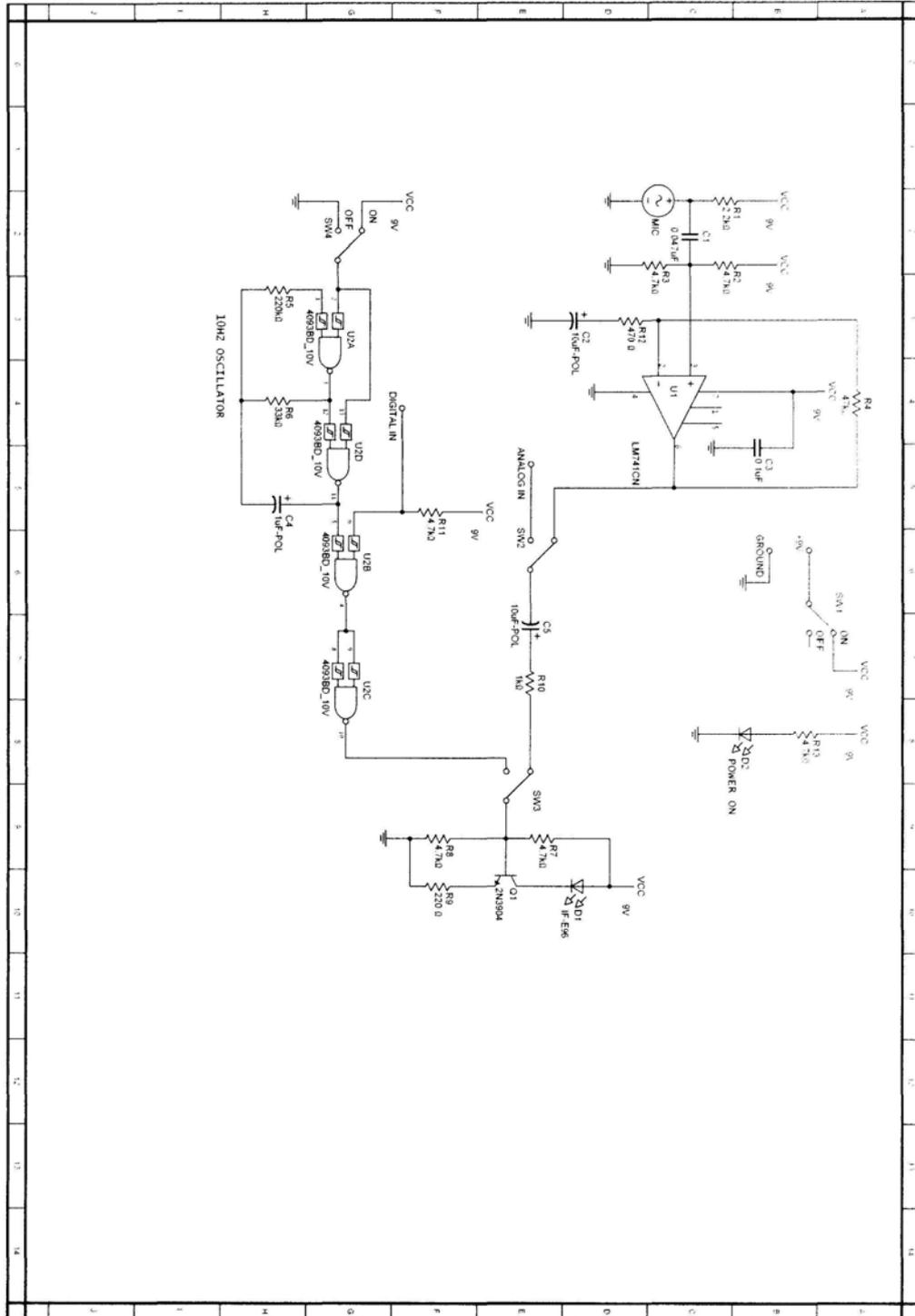
- Adquirir un multiplexor WDM para POF para estar en la capacidad de utilizar la fibra para una comunicación full-duplex; de esta manera se usa solo un cable de fibra óptica y además se pueden apreciar otros efectos de la transmisión y recepción, por ejemplo el aislamiento que debe existir entre las dos señales para que no se interfieran.
- Para hacer una comparación de la POF versus cable UTP, se puede adquirir un par de tarjetas de red de POF para PC, de esta manera la comparación puede ser más palpable.
- La tecnología de POF está en crecimiento y nuevas técnicas de fabricación de POF de índice gradual están dándose a conocer, en experimentos se están obteniendo tasas de bits cada vez mayores en

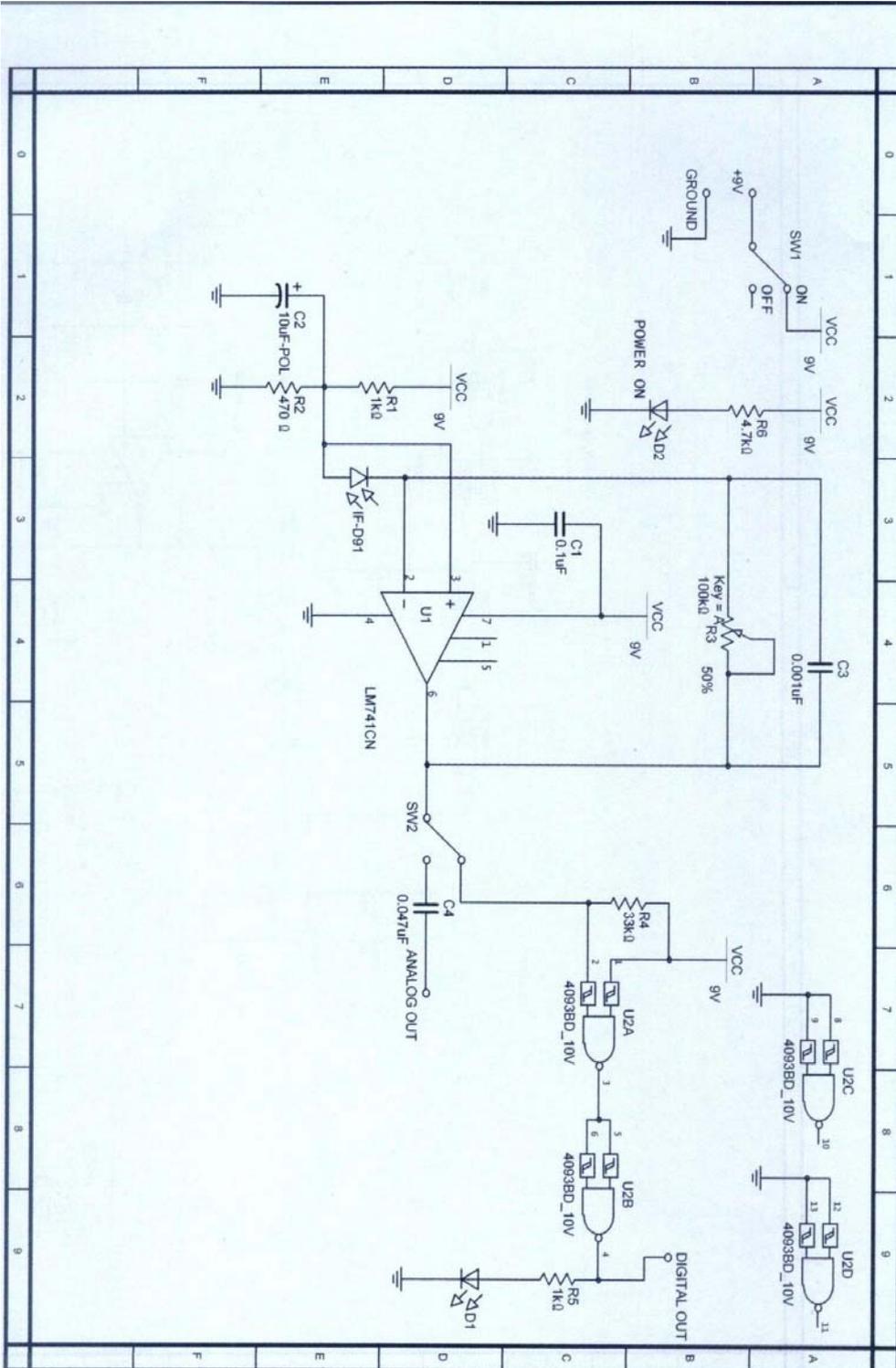
distancias superiores. Por esto consideramos que el interés en la POF debe mantenerse.

- Se puede utilizar un dispositivo que a la señal que se baya a transmitir le induzca ruido, de esta manera se puede observar características de desempeño frente a una señal ruidosa, que pueden ser analizados en un analizador de espectro.
- La POF puede ser usada como sensor en algunas áreas, esta aplicación no ha sido muy explotada y una investigación acerca de este tema nos lleva al campo de la telemetría, donde podría ser de mucho uso.

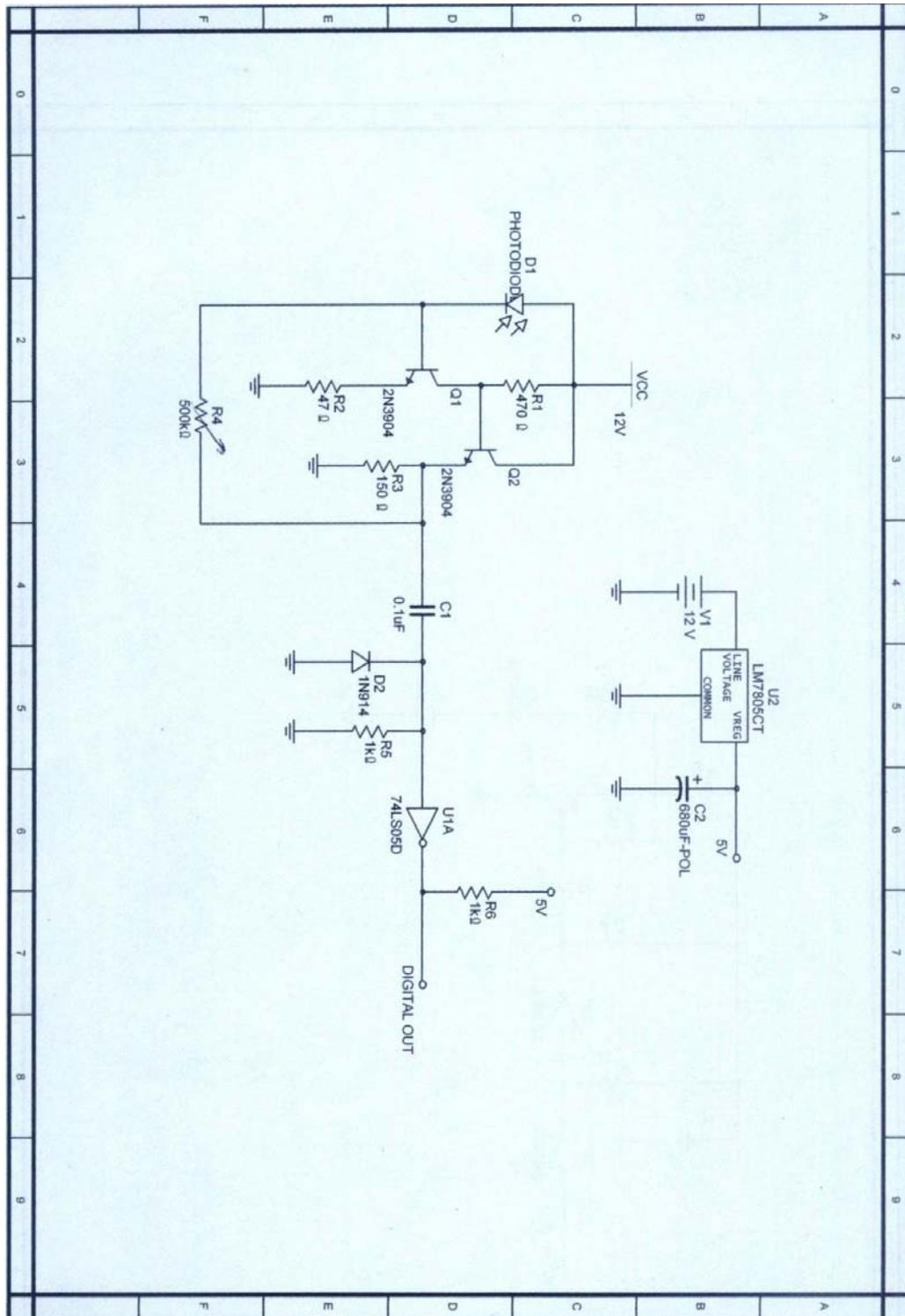
## **APENDICE A**

TRANSMISOR ANALOGICO





## RECEPTOR DIGITAL



## APENDICE D

### COMPARACION DE COSTOS ENTRE UN KIT DE POF Y UN KIT DE GOF

A continuación, un resumen de costos de los equipos/materiales adquiridos para el kit de entrenamiento de fibra óptica de plástico y un resumen de los costos de materiales /equipos que se necesitarían para un kit similar pero donde se utilice fibra óptica de vidrio.

KIT BASICO DE FIBRA OPTICA DE PLASTICO				
COMPONENTE	COD.	CANT.	PRECIO	R/.
phototransistor	if-d92	4	\$ 2,43	\$ 9,72
photodarlington	if-d93	4	\$ 3,77	\$ 15,08
photologic detector 155 mbps	if-d98	2	\$ 20,67	\$ 41,34
led ir	if-e91a	4	\$ 2,22	\$ 8,88
led green	if-e93	2	\$ 7,08	\$ 14,16
led red	if-e96	4	\$ 3,25	\$ 13,00
led red 155 mbps	if-e99	2	\$ 22,85	\$ 45,70
Fiber optic crimping tool	if-370045	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Micro-strip stripping tool	if-370075	1	\$ 75,00	\$ 75,00
ST conector	if-c-st	6	\$ 5,00	\$ 30,00
Fiber polishing kit	if-c-pk	1	\$ 7,00	\$ 7,00
power meter	if-fom	1	\$ 250,00	\$ 250,00
sh4001 super eska fiber, m	if-c-e1000	40	\$ 1,60	\$ 64,00
single position plug assembly	228087-1	4	\$ 1,09	\$ 4,36
single position blukhead receptable	228042-1	4	\$ 1,50	\$ 6,00
splice reintroduced	228051-1	4	\$ 0,25	\$ 1,00
retention clip	228046-1	8	\$ 0,23	\$ 1,84
index matching gel 10 ml.	if-420015	1	\$ 8,00	\$ 8,00
ST barrel conector	IF-820063	6	\$ 7,00	\$ 42,00
<b>SUBTOTAL IFIBER OPTICS</b>				<b>\$ 687,08</b>
shipping				\$ 175,00
<b>TOTAL+SHIPPING</b>				<b>\$ 862,08</b>
integrado sony pcm audio		2	\$ 16,00	\$ 40,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 902,08</b>

**KIT BASICO DE FIBRA OPTICA DE VIDRIO**

COMPONENTE	CANT.	PRECIO	R/.
Diodo Láser 640 nm	4	\$ 112,00	\$ 448,00
Photodetector 155 mbps	2	\$ 20,67	\$ 41,34
LASER MODULE 640NM 5MW	4	\$ 72,00	\$ 288,00
Belkin A2F20277-1000 ft. Fiber Optic Patch Cable	40	\$ 2,66	\$ 106,40
Agilent / HP E5970A Handheld Optical Power Meter	1	\$ 1.650,00	\$ 1.650,00
Furukawa Fitel S-174H Fusion Splicer Fiber Optic Cable	1	\$ 5.499,00	\$ 5.499,00
Collimator lens 12CH FLAT 1.5MM limador de fibra	1	\$ 34,50	\$ 34,50
MOUNT LED F/OPTIC ST STD. soporte de led	10	\$ 8,57	\$ 85,70
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 8.152,94</b>

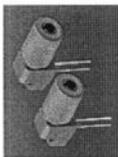
# APENDICE E

Factura de los elementos empleados en la implementación del proyecto.  
Industrial Fiber Optics Inc. y BG Micro.

Commerical Invoice		
Invoice Date	Invoice No.	Customer PO No.
6/28/2006	1929	EMAIL_06212006

Total \$655.08

**Industrial Fiber Optics**  
627 South 48th Street, Suite 100  
Tempe, Arizona 85281 USA  
480-804-1227 FAX 480-804-1229  
www.i-fiberoptics.com



Sold To: JOSELO BORBOR-CAMACHO  
TOMAS MARTINEZ  
#506 Y BARUERIZO MORENO  
GUAYACUIL  
ECUADOR

Shipped To: JOSELO BORBOR  
c/o TRINIDAD BORBOR  
2555 PONCE DE LEON BLVD  
5TH FLOOR SUITE 500  
CORAL GABLES FL 33134  
USA

Shipped Via	Terms	Quantity	Balance Remaining	Stock ID	U/M	Description	Customer Phone Number	Harmonized Codes	Unit Price	Extended
UPS	CREDIT CARD						AZ			
Ordered		4.00	0.00	IF D92	EA	PHOTODETECTOR		8541409500	\$2.43	\$9.72
		4.00	0.00	IF D93	EA	PHOTODETECTOR		8541409500	\$3.77	\$15.08
		2.00	0.00	IF D98	EA	PHOTODETECTOR		8541409500	\$20.67	\$41.34
		4.00	0.00	IF E91A	EA	LED F/O IR 940nm		8541409500	\$2.22	\$8.88
		2.00	0.00	IF E93	EA	LED F/O GREEN 530nm		8541409500	\$7.08	\$14.16
		4.00	0.00	IF E96	EA	LED F/O RED660nm		8541409500	\$3.25	\$13.00
		2.00	0.00	IF E99	EA	LED F/O RED 650nm		8541409500	\$22.85	\$45.70
		1.00	0.00	IF 370045	EA	CRIMPER F/O ST/VERSA-LINK		8205595505	\$50.00	\$50.00
		6.00	0.00	IF CST	EA	CONNECTOR FIBER ST		8538906000	\$5.00	\$30.00
		1.00	0.00	IF CPK	EA	FIBER POLISHING KIT		9001100030	\$7.00	\$7.00
		1.00	0.00	IF FOM	EA	FIBER OPTIC TEST SET		8205595505	\$250.00	\$250.00
		20.00	0.00	IF C E1000	M	SH4001 SUPER ESKA FIBER		9001100030	\$1.60	\$32.00
		4.00	0.00	22 80871	EA	PLUG SIMPLEX DNP		8538906000	\$1.09	\$4.36
		4.00	0.00	22 80421	EA	BULKHEAD F/O SINGLE POS DNP		8538906000	\$1.50	\$6.00
		4.00	0.00	22 80511	EA	SPLICE F/O DNP		8538906000	\$0.25	\$1.00
		8.00	0.00	22 80461	EA	RETENTION CLIP F/O DNP		8538906000	\$0.23	\$1.84
		1.00	0.00	40 0015	EA	INDEX MATCHING GEL		8538906000	\$8.00	\$8.00
		6.00	0.00	IF 820063	EA	SLEEVE ST MATING SLEEVE		8538906000	\$7.00	\$42.00

**BG MICRO INVOICE**  
**555 North 5th St. STE 125**  
**Garland, TX 75040**

*Customer Number* 64137

*Order/Invoice Number:* 1272125

EARLY LEARNING--TRINIDAD BORBOR  
 ACT PAY SUITE 500  
 2555 PONCE DE LEON BLVD  
 CORAL GABLES, FL 33134

*Date* 6/5/2006

*Terms:* Credit Card

*Customer PO*

*Shipping Method* UPS GROUND

*EMAIL\_ADD:* TSBORBOR@YAHOO.COM

*Comments:*

<i>PRODUCTID</i>	<i>PRODUCTNAM</i>	<i>Qty</i>	<i>Unit Price</i>	<i>Extended</i>
COM1159	SONY PCM AUDIO BREAKO	2	\$15.95	\$31.90
				<i>Sub-Total</i> \$31.90
				<i>Shipping Cost</i> \$8.92
				<i>Insurance</i> \$0.00
				<i>Total</i> \$40.82

## **APENDICE F**

### **“KIT DE ENTRENAMIENTO SOBRE LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA”**

#### **GUIA PRÁCTICA**



## Práctica # 1

### TRANSMISION EN EL CABLE DE FIBRA OPTICA Y COEFICIENTES DE ATENUACION.

#### Introducción:

Más de 99 por ciento de las fibras ópticas usadas en el mundo son hechas de vidrio o plástico. Las actividades en este manual utilizaran una fibra óptica con núcleo de plástico. Es fácil de usar, segura y en la mayoría de los casos tratada como si fuera un cable de cobre.

En cada campo el rendimiento tiene su propio significado. En fibra óptica uno de los términos que define el rendimiento es la atenuación, o pérdida de luz por unidad de distancia. En esta actividad se medirá la atenuación a través de diferentes longitudes de fibra.

#### Objetivos:

- En esta práctica se medirá la luz transmitida a través de varias medidas de longitud de fibra óptica.
- Relacionarse con los elementos básicos de la transmisión óptica: los fotodetectores y los fototransmisores.
- Hacer uso de uno los equipos más importantes en la comunicación óptica: el medidor de potencia óptica (OPM) y comparar datos reales de potencia con resultados obtenidos teóricamente.
- Tener la capacidad de escoger entre varios fotoemisores, tomando en cuenta sus características de transmisión de potencia.

#### Materiales:

- LED verde.
- LED rojo.
- LED infrarrojo.
- Fototransistor.
- Resistencia 390  $\Omega$ .
- Multímetro.
- Fibra óptica de plástico (1m y 3m).
- Fuente de voltaje.

### Procedimiento:

1. Corte 2mm de los extremos de la fibra de 1m y 3m. Trate de obtener un corte transversal preciso con un ángulo de 90°.
2. En las prácticas que realizaremos, se utilizarán emisores y detectores ópticos que se encuentran insertados dentro de un recubrimiento de plástico que tiene un orificio con un receptáculo a manera de tuerca que permite conectar la fibra de plástico al dispositivo óptico fácilmente. El mecanismo para insertar la fibra es sencillo, primero se abre la tuerca y se inserta la fibra, después se asegura la tuerca y de esta manera la fibra estará acoplada firmemente al dispositivo óptico. En la siguiente figura se puede apreciar un corte transversal del dispositivo.

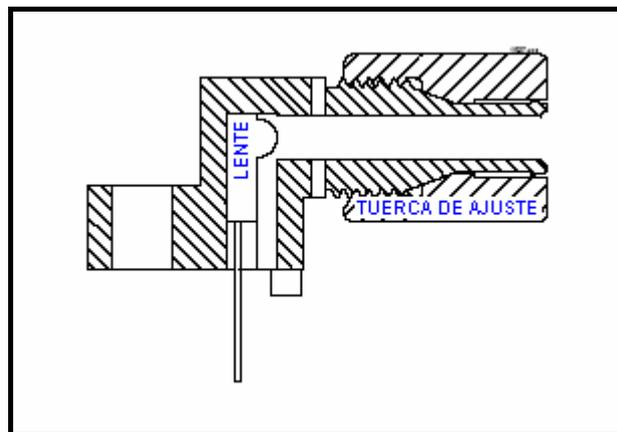


Figura 1.1. Corte transversal del receptáculo donde se alojan los Elementos foto-receptores y foto-transmisores.

3. Inserte y asegure uno de los extremos del cable óptico de 3 metros al fototransistor de la manera explicada en el punto anterior, y haga lo mismo con el extremo sobrante, fijándolo en el montaje del LED rojo.
4. Con el multímetro ajuste la fuente variable a +5 voltios DC.
5. Arme el circuito a continuación.

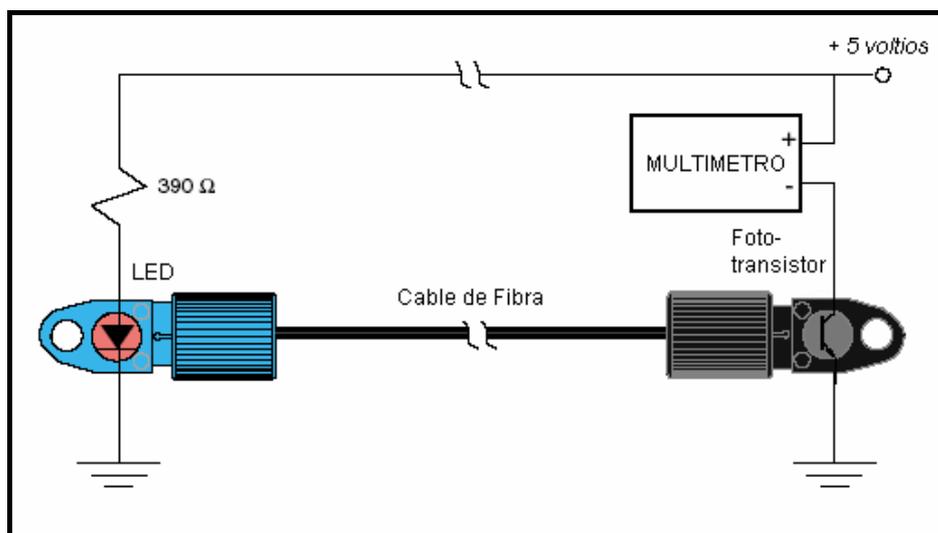


Figura 1.2. Circuito de medición de potencia de transmisión.

6. Cambie la función del multímetro para que lea corriente en la escala de 2mA.
7. Encienda la fuente y anote la corriente que muestra el multímetro en la tabla 1.1. Una vez terminada la lectura apague la fuente.
8. Reemplace el LED rojo por el verde.
9. Encienda la fuente y anote la lectura del multímetro en la tabla 1.1. Una vez terminada la lectura apague la fuente
10. Reemplace el LED verde por el LED infrarrojo.
11. Encienda la fuente y anote la lectura del multímetro en la tabla 1.1. Una vez terminada la lectura apague la fuente
12. Remueva de los dispositivos ópticos la fibra óptica de 3m y coloque y asegure la fibra de 1m al LED rojo y al fototransistor.
13. Repita del paso 7 a 11 y anote los resultados en la tabla 1.1

• LED	$i_{3\text{-metros}}$	$i_{1\text{-metro}}$
• Rojo	•	•
• Verde	•	•
• Infrarrojo	•	•

Tabla 1.1. Medición de corriente en un fototransistor para 1 y 3 metros de fibra óptica.

**Análisis y preguntas:**

En general, la potencia de salida de un cable de fibra a una longitud dada esta definida por la ecuación:

$$P_l = P_o \cdot e^{-\alpha l}$$

$P_o$  – Potencia de Salida

$L$  – Longitud del la fibra

$\alpha$  – Coeficiente de atenuación

De la ecuación anterior, otra ecuación puede ser derivada para determinar el coeficiente de atenuación,  $\alpha$ , teniendo medida la potencia óptica de salida en dos longitudes diferentes. La ecuación es:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{L_2 - L_1}$$

$P_2$  – Potencia de Salida de la fibra de longitud 2

$P_1$  – Potencia de Salida de la fibra de longitud 1

$l_2$  – fibra de longitud 2

$l_1$  – fibra de longitud 1

En esta actividad no se mide potencia óptica, pero si se mide la corriente del fototransistor, la cual es linealmente proporcional a la potencia óptica. Substituyendo la potencia óptica por la corriente se reescribe la ecuación anterior y quedaría:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{L_2 - L_1}$$

$I_2$  – Corriente medida con la fibra de 1 metro  
 $I_1$  – Corriente medida con la fibra de 3 metros  
 $L_2$  – fibra de longitud de 1 metro  
 $L_1$  – fibra de longitud de 3 metros

Complete la Tabla 1.2 calculando el coeficiente de atenuación para cada uno de los LED.

• LED	• $\frac{i_{(3-m)}}{i_{(1-m)}}$	• $\ln \frac{i_{(3-m)}}{i_{(1-m)}}$	• $\alpha = \frac{\ln \frac{i_{(3-m)}}{i_{(1-m)}}}{-2}$
• Rojo	•	•	•
• Verde	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•

Tabla 1.2. Tabla para el cálculo del coeficiente de atenuación.

¿Son los valores de los coeficientes de atenuación los mismos para todos los LED? ¿Por qué?

La potencia de salida (corriente) en una fibra puede ser calculada despejando la fórmula inicial. De esta manera tenemos:

$$P_o = P_l \cdot e^{\alpha l}$$

Calcule la potencia de salida para cada LED usando la tabla 1.3 (Substituya la corriente del fototransistor por potencia).

• LED	• $P_1$ metro	• $\alpha$	• $e^{\alpha(1)}$	• $P_o = P_{1-m} \cdot e^{\alpha(1)}$
• Rojo	•	•	•	•
• Verde	•	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•	•

Tabla 1.3. Calculo de la potencia de salida.

Calcule el valor real de potencia dado por un medidor de potencia óptica para la fibra de 1 metro. Desconecte el extremo de la fibra de 1 metro del fototransistor (dejando el otro extremo conectado en los fotoemisores) y colóquelo en el receptáculo del detector en el OPM habiendo antes seguido las debidas instrucciones de enceramiento y manejo del medidor de potencia, y compare los datos teóricos con los datos experimentales obtenidos recientemente en la Tabla 1.4.

• LED	• $P_{1\text{ metro teóricó Tabla 4.3}}$	• $P_{1\text{ metro OPM práctico}}$
• Rojo	•	•
• Verde	•	•
• Infrarrojo	•	•

Tabla 1.4. Comparación de los datos experimentales y teóricos

Calcule la corriente en el fototransistor producida por la luz de los LED en una fibra de 5 metros. Use la Tabla 1.5

• LED	$P_o(\text{mA})$	• A	• I	$e^-$ $\alpha(\text{5})$	• $P_{5-m} = P_o \cdot e^{-\alpha(5)}$
• Rojo	•	•	•	•	•
• Verde	•	•	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•	•	•

Tabla 1.5. Calculo de la corriente de transmisión en una fibra de 5 metros.

Calcule la corriente en el fototransistor producida por la luz de los LED en una fibra de 10 metros. Use la Tabla 1.6

• LED	$P_o(\text{mA})$	• A	• I	$e^-$ $\alpha(\text{5})$	• $P_{10-m} = P_o \cdot e^{-\alpha(10)}$
-------	------------------	-----	-----	-----------------------------	--

• Rojo	•	•	•	•	•
• Verde	•	•	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•	•	•

Tabla 1.6. Calculo de la corriente de transmisión en una fibra de 10 metros.

Grafique la corriente de fototransistor medida para 1m. y 3m. y las corrientes medidas para 5m y 10m para los LED, vs. la longitud del cable en una hoja cuadriculada. Y haga una explicación breve de lo que observa.

## Práctica # 2

### CONECTORES Y EMPALMES.

#### Introducción:

Como se acaba de ver, los enlaces de fibra óptica no son perfectos porque parte de la luz es perdida a través del núcleo óptico. Los sistemas de fibra óptica no siempre pueden ser instalados con una fibra de una sola longitud ininterrumpida. Usualmente dos o mas longitudes de fibra deben ser unidos para obtener la longitud deseada. Perdidas de este tipo son llamadas extrínsecas porque ocurren afuera del núcleo de fibra.

#### Objetivos:

- En esta práctica se medirá atenuación en un conector y en un empalme de fibra óptica.
- Se comparará la pérdida de potencia óptica al acoplar dos tramos de fibra vs. un tramo de fibra continuo.
- Se adquirirá destreza en el manejo de un par de métodos de empalme: conectores y empalmes.
- Al finalizar la práctica se tendrá la capacidad de escoger el empalme correcto de acuerdo a las circunstancias.

#### Materiales:

- Fototransistor.
- 1m., 2m. de fibra óptica de plástico.
- LED rojo.
- LED infrarrojo.
- Terminal macho simple.

- Receptáculo hembra simple.
- Clips de retención.
- Empalmes.
- Resistencia 390  $\Omega$ .
- Multímetro.
- Fuente de voltaje variable.
- Peladora de fibra.
- Tijera o cuchillo.

### Procedimiento # 1: Conectores de fibra.

1. Tome 1m de fibra óptica de plástico y use el pelador de fibra para remover 5mm del revestimiento de uno de sus extremos. Tener cuidado al remover el revestimiento de la fibra para no cortar parte del núcleo, esto puede ocasionar que se pierda luz.
2. Use el terminal macho simple e inserte el extremo descubierto de la fibra en este. Repita estos pasos también para uno de los extremo de la fibra de 2m.
3. Arme el siguiente circuito. Use el LED infrarrojo como fuente de luz.

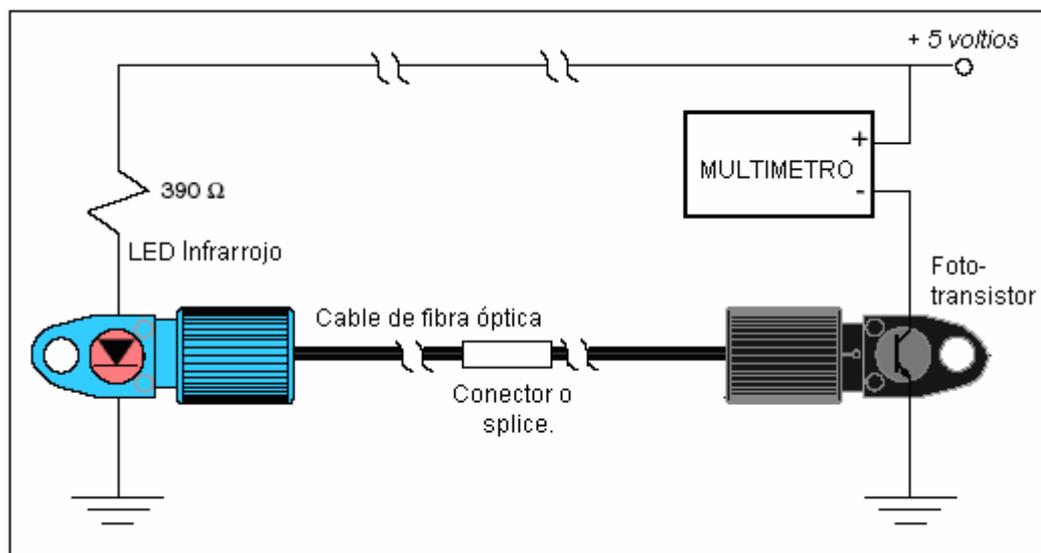


Figura 2.1. Circuito de medición de potencia de transmisión con conectores o empalmes.

4. Encender el multímetro y usarlo para medir corriente en la escala de 20mA.
5. Inserte el extremo de la fibra de 2m en el LED infrarrojo y asegure.

6. Inserte el otro extremo de la fibra de 2m en el receptáculo hembra simple y asegure.
7. Inserte también el extremo de la fibra de 1m con el terminal macho en el receptáculo hembra simple y asegure.
8. Inserte el otro extremo al fototransistor y asegure.
9. Prenda la fuente de voltaje variable y ajústela a +5 voltios DC.
10. Observe la lectura del multímetro y escríbala en la medición 1 de la tabla 2.1.
11. Apague la fuente de voltaje.
12. Remueva el extremo de la fibra de 1m del receptáculo hembra simple y rote el terminal macho simple, incluyendo la fibra, en dirección de las manecillas del reloj 90 grados. Re-inserte el terminal macho en el receptáculo hembra simple y asegure.
13. Vuelva a medir la corriente en el fototransistor con el multímetro y anótela en la medición # 2 de la tabla 2.1.
14. Repita los pasos 12 y 13 dos veces más y anote los resultados en las mediciones 3 y 4 de la tabla 2.1 respectivamente.
15. Apague la fuente de voltaje.

• LED	• Posición	i conector
• Infrarrojo	• #1	•
•	• #2	•
•	• #3	•
•	• #4	•

Tabla 2.1. Medición de corriente en el fototransistor con un empalme con conectores.

### Procedimiento #2: Empalmes.

1. Remueva las fibras de 1m y 2m del receptáculo hembra simple. Así como los otros extremos que están sujetos al LED y al fototransistor.
2. Usando una tijera o cuchillo, rebane el conector terminal macho simple de los dos extremos de las fibras de 1 y 2 metros. Para preservar las medidas de la fibra haga el corte lo más cercano al terminal macho simple.
3. Para obtener un ángulo de 90 grados preciso, corte 1 mm adicional de fibra con el cortador de fibras plásticas en una superficie plana.
4. Tome un clip de retención y mírelo de cerca. Identifique el final del clip de retención el cual está ubicado en la pestaña en “v” que tiene de

- cada clip. Posteriormente se insertará el extremo libre del cable de fibra de 1 metro en el clip de retención.
5. Coloque al clip en posición vertical con la pestaña hacia abajo en una superficie plana y presione el extremo de la fibra hasta que el clip se inserte por completo en el. Repita los pasos 4 y 5 con el extremo de la fibra de 2 metros.
  6. Inserte los extremos de las fibras de 1 y 2 metros con clips de retención en el empalme. Presione hasta que los núcleos de las fibras hagan contacto dentro del empalme.
  7. Encienda la fuente de voltaje.
  8. Registre la corriente medida en el fototransistor en la tabla 2.2 y apague el circuito.
  9. Repita este procedimiento para los LED rojo normal e infrarrojo y registre los datos.

• <b>LED</b>	<b>i</b> empalm e
• Rojo	•
• Infrarrojo	•

Tabla 2.2. Medición de corriente en el fototransistor con un empalme con empalme.

### **Análisis y Preguntas.**

De la práctica anterior en la tabla 1.1, copie la corriente medida por el fototransistor para el diodo infrarrojo con la fibra de 3 metros de longitud y anótelas repetitivamente en la columna 3 de la tabla 2.3.

Copie los datos de la tabla 2.1 y escríbalos en la columna 4 de la tabla 2.3.

Divida la columna 4 para la columna 3 y multiplique por 100, y escriba los resultados en la columna 5.

¿Es la transmisión por fibra mejor o peor después de instalar el conector en la fibra de 3m?

¿Qué le sucede a la corriente del fototransistor a medida que se gira el terminal macho simple con la fibra de 1 metro con respecto al receptáculo hembra? Describa las condiciones físicas que están ocurriendo y por qué?

• LED	• Rotación	$I_{act. anterior}$	$I_{conector}$	• %transmisión
• Infrarrojo	• #1	•	•	•
	• #2	•	•	•
	• #3	•	•	•
	• #4	•	•	•

Tabla 2.3. Comparación de características de transmisión entre un cable óptico continuo de 3 metros y un cable de 3 metros empalmado con conectores.

De la práctica anterior en la tabla 1.1, copie las corrientes medidas por el fototransistor para el diodo rojo, el rojo súper brillante y el infrarrojo, con la fibra de 3 metros de longitud continua y anótelas repetitivamente en la columna 2 de la tabla 2.4.

Divida la columna 3 para la columna 2, multiplique por 100 y registre los resultados.

¿Es la transmisión mayor para los 3m de fibra con el empalme instalado o con los conectores? ¿Es esto lo que usted se esperaba? ¿Por qué?

• LED	$I_{act. anterior}$	$I_{empalme}$	• %de transmisión
• Rojo	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•

Tabla 2.4 Comparación de características de transmisión entre un cable óptico continuo de 3 metros y un cable de 3 metros empalmado con empalmes.

En sus propias palabras, nombre por lo menos 2 ventajas y 2 desventajas de los conectores versus empalmes.

### **Práctica # 3**

#### **REFLEXION DE FRESNEL: GEL DE ACOPLE DE INDICES.**

##### **Introducción:**

El método más usado para minimizar pérdidas causadas por desajuste de alineamiento es mantener muy cerca las tolerancias en los diámetros y en el centro del núcleo de la fibra óptica.

Otra pérdida extrínseca común es causada por la reflexión de Fresnel. Estas reflexiones son análogas a la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) que reducen la potencia transmitida en aplicaciones de radio frecuencia.

Las pérdidas de Fresnel en un conector o empalme de fibra óptica pueden ser reducidas por un método conocido como acople de índices. Esto se refiere a llenar el espacio microscópico de aire que se encuentra entre dos núcleos ópticos con un material que tiene un índice de refracción muy cercano al índice del núcleo de la fibra óptica.

##### **Objetivos:**

- Se observará los efectos de pérdida que produce la reflexión de Fresnel presente en los acoples fibra-aire al conectar el cable óptico a un equipo emisor o un receptor.
- Se observará como el gel de acoplamiento de índices reduce las pérdidas de reflexión de Fresnel en un empalme de fibra óptica.
- Se seguirá trabajando con empalmes y seguiremos familiarizándonos y adiestrándonos con su instalación.

**Materiales:**

- Fototransistor.
- LED rojo.
- LED infrarrojo.
- 1m, 2m de fibra óptica de plástico.
- Resistencia de 390  $\Omega$ .
- Fuente de voltaje variable.
- Multímetro.
- Empalme.
- Gel de acoplamiento de índices.

**Procedimiento:**

1. Comience esta actividad con el LED rojo como fuente de luz.
2. Arme el siguiente circuito.
3. Encienda el multímetro y elija la función de medir corriente en la escala de 2mA.
4. Inserte el extremo libre de la fibra de 2m en el LED rojo y asegure (el otro extremo debe estar insertado en el empalme de la actividad anterior así como uno de los extremos de la fibra de 1m).
5. Inserte el otro extremo libre de la fibra de 1 metro y ajústelo en el fototransistor.
6. Ajuste la fuente de voltaje a +5 voltios DC.
7. Anote la corriente medida en la fila 2 columna 2 de la tabla 3.1.
8. Apague y remueva el extremo de la fibra que se encuentra en el LED rojo.
9. Reemplace el LED rojo por el LED infrarrojo e inserte el extremo de la fibra de 2m y asegure.

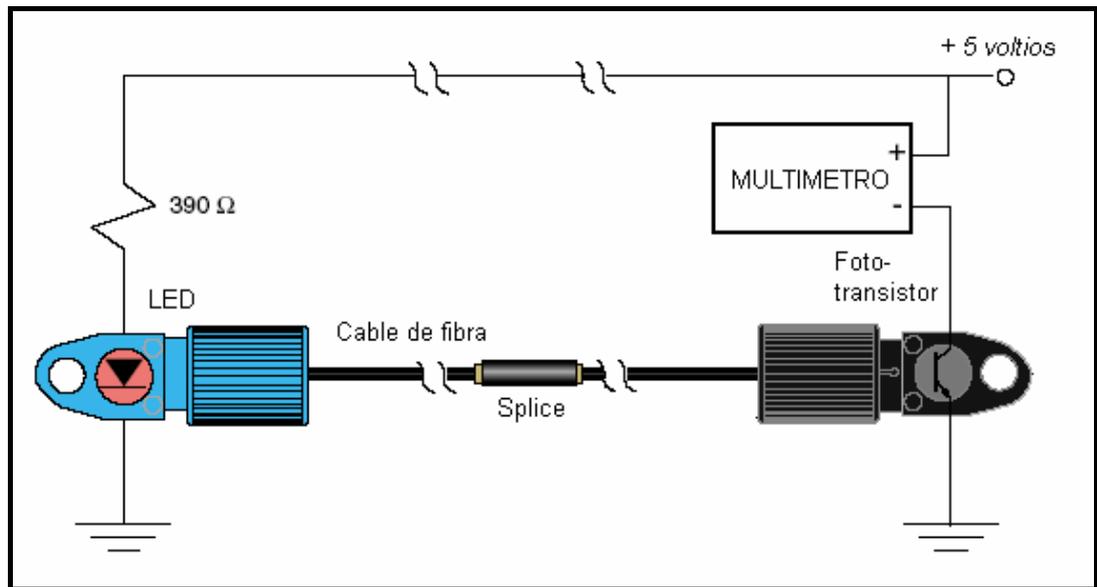


Figura 3.1. Circuito de medición de potencia de transmisión con empalmes.

10. Prenda la fuente de voltaje.
11. Anote la corriente medida por el multímetro en la fila 3 columna 2 de la tabla 3.1.
12. Apague la fuente de voltaje y repita para el LED rojo súper brillante y registre los datos de corriente.
13. Apague la fuente y remueva la fibra de 1m del empalme.
14. Usando un gotero deje caer glicerina en el núcleo de la fibra de 1m. así como en el interior del empalme.

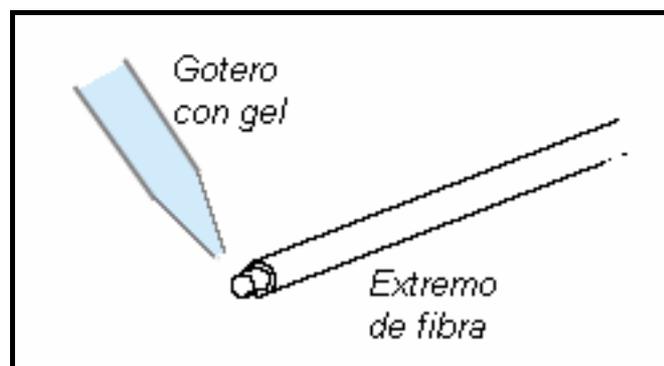


Figura 3.2. Manera correcta de aplicar el gel en una fibra.

15. Inserte otra vez la fibra dentro del empalme, hasta que hagan contacto los núcleos dentro de él.
16. Encienda la fuente y anote las corrientes medidas en la columna 3 de la tabla 3.1, para los diferentes LED: rojo e IR.
17. Apague la fuente.

• LED	$i_{empalme}$	$i_{indice-acoplado\ gel}$
• Rojo	•	•
• Infrarrojo	•	•

Tabla 3.1. Medición de corriente en el fototransistor con un empalme con empalme que ha sido rellenado con gel de acoplamiento.

### Análisis y Preguntas

Copie los valores de la tabla 3.1 en la tabla 3.2.

Para llenar la columna 4 (% mejoría) divida los datos de la columna 3 para la columna 2, réstele 1 y multiplique este resultado por 100. Escriba los resultados en la tabla 3.2.

• LED	$i_{empalme}$	$i_{indice-acoplado\ gel}$	• % de mejoría
• Rojo	•	•	•
• Infrarrojo	•	•	•

Tabla 3.2. Comparación de las características de transmisión de un tramo de fibra empalmado con empalme con gel de acoplamiento de índices.

Explique el cambio en la transmisión indicado en la columna 4 de la tabla 3.2.

Explique en sus propias palabras que significa acoplamiento de índices.

Calcule la magnitud de la reflexión de Fresnel usando la ecuación que se menciona en el inicio de esta práctica. Asuma el índice de refracción del medio #1, el núcleo de la fibra de plástico, 1.49 y del medio #2 el aire, 0.1.

## **Práctica # 4**

### **TERMINACIONES EN LA FIBRA: TECNICAS DE PULIDO.**

#### **Introducción:**

La preparación del final de una fibra óptica es muy importante a la hora de acoplar dos fibras. El final de la fibra debe tener una superficie totalmente plana sin irregularidades o imperfecciones que puedan esparcir luz afuera del cono de luz esperado.

#### **Objetivos:**

- En esta práctica se podrán apreciar los efectos de diferentes tipos de terminaciones de fibra.
- Se aprenderá a preparar los extremos de las fibras previo a un acople con empalmes, conectores o elementos transmisores o receptores; para una eficiente transmisión de luz.

## Materiales

- Fototransistor.
- 1m, 2m de fibra óptica de plástico.
- LED rojo.
- Lija # 2000.
- Lija de 3  $\mu\text{m}$ .
- Resistencia 390  $\Omega$ .
- LED infrarrojo.
- Cortador de Fibra de Plástico.
- Agua, aceite o glicerina.
- Multímetro.
- Fuente de voltaje variable.

## Procedimiento #1: Pulir la fibra

1. Arme el siguiente circuito.

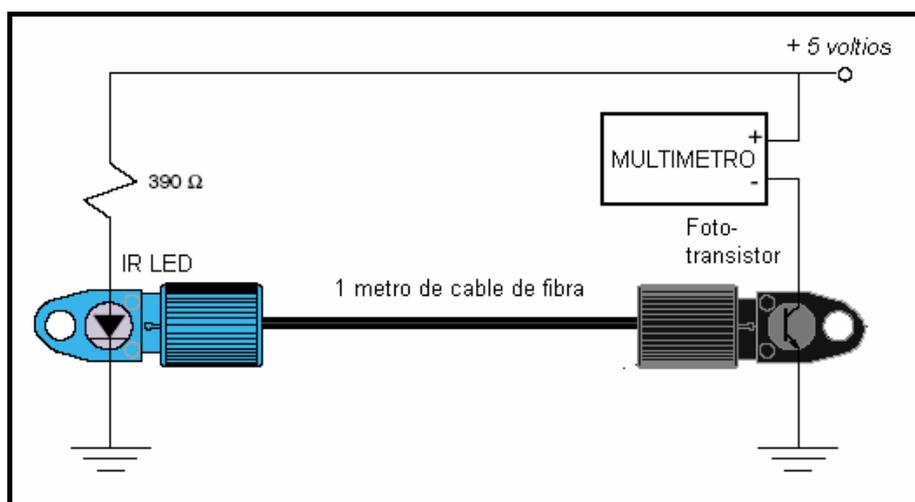


Figura 4.1 Diagrama para la medición de las pérdidas de potencia en las fibras por defectos en sus terminaciones.

2. Cortar ambos extremos de 1m de fibra óptica con una tijera o un cuchillo.
3. Inserte y asegure los extremos de la fibra tanto en el LED IR como en el fototransistor.
4. Seleccione la opción de corriente en la escala de 2mA en el multímetro.
5. Encienda la fuente de poder y ajustar a + 5 Voltios DC.
6. Anote la lectura del multímetro que corresponde a la corriente del fototransistor en la tabla 4.1.
7. Saque la fibra del LED IR y del fototransistor y corte 1mm de la fibra con el cortador de fibra, intentar hacer un corte de 90 grados es decir que la superficie esté lo más recta posible.
8. Inserte nuevamente el extremo en el LED IR y el fototransistor y asegure.
9. Mida la corriente del fototransistor y anótela en la tabla 4.1
10. Remueva la fibra del LED IR y el fototransistor.
11. Coloque la lija # 2000 en una superficie dura y recta.
12. Humedezca el centro de la lija con agua, aceite o glicerina.
13. Sostenga el extremo de la superficie de la fibra que fue removida del LED IR y apóyela perpendicularmente a la lija que se encuentra en la superficie plana y dura, y empiece a realizar movimientos en forma de 8 para lijar la superficie de la fibra, como en el siguiente grafico.

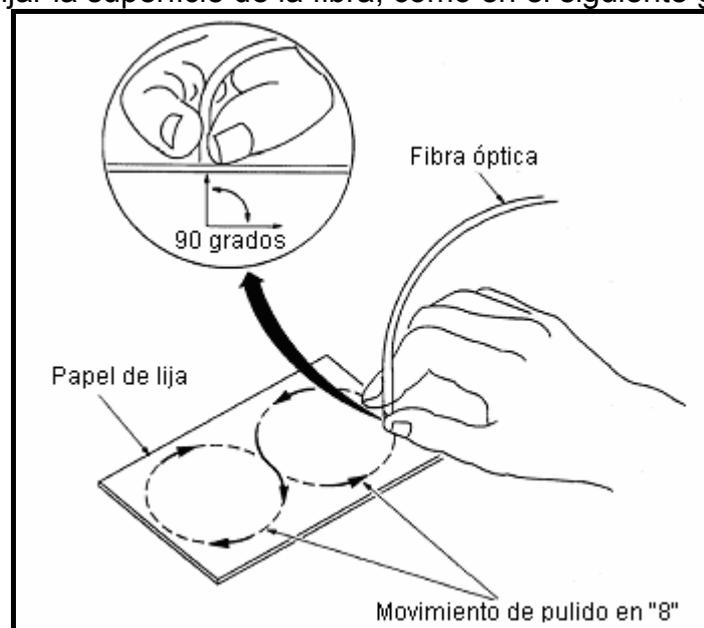


Figura 4.2 Posición y patrón de movimiento en el pulido de la fibra óptica plástica.

14. Con 20 movimientos será suficiente, no trate de apretar la fibra con la lija, simplemente apóyela y realice los movimientos.
15. Repita los pasos 13 y 14 con el otro extremo de la fibra.
16. Coloque la lija de 3  $\mu\text{m}$  en una superficie dura y recta y humedezca el centro con agua, aceite o glicerina.
17. Repita el paso 13 con un extremo de la fibra de 1 m, con la lija de 3  $\mu\text{m}$ .
18. Realice 20 movimientos en 8.
19. Aprecie la diferencia entre las dos extremos, sería muy útil tener una lupa para visualizar la diferencia de la fibra que fue pulida con lija # 2000 y la que fue pulida con ambas # 2000 y la lija de 3  $\mu\text{m}$ .
20. Tomar el extremo de la fibra de 1m y pulir con la lija de 3 $\mu\text{m}$ .
21. Insertar y asegurar el extremo pulido al LED IR y medir la corriente del fototransistor en el multímetro y anotarla en la tabla.

• Tipo de terminación	• Corriente del fototransistor
• Cuchillo	•
• Cortador de fibra	•
• Fibra pulida	•

Tabla 4.1. Corriente de transmisión para una fibra de 1 metro con tres diferentes preparaciones de terminación.

### Análisis y Preguntas

Dibuje un bosquejo de la fibra pulida con la lija # 2000 y la fibra pulida con la lija de 3  $\mu\text{m}$ .

Reescriba los datos de la tabla 4.1 en la tabla 4.2.

En la columna 3, fila 2 escriba el resultado de la división entre corriente del fototransistor con el corte de cuchillo para el con la fibra pulida. Y en la columna 3, fila 3 la división entre la corriente con el cortador de fibra y la fibra ya pulida.

El porcentaje de pérdidas será el resultado de restar uno a la columna 3 y multiplicar el resultado por 100. Tomando como la transmisión perfecta a la terminación trabajada con la fibra pulida, donde su pérdida será el 0%.

• Tipo de terminación	• Corriente del fototransistor	• Columna 3	• % Pérdidas
• Cuchillo	•	•	•
• Cortador de fibra	•	•	•
• Fibra pulida	•	•	•

Tabla 4.2. Calculo de pérdidas debido a la preparación de las terminaciones de la fibra.

¿Se incrementan las pérdidas con un pobre trabajo en las terminaciones de los extremos de la fibra? ¿Por qué? Describa como la textura de la terminación influye en la corriente del fototransistor.

## Práctica # 5

### VELOCIDAD DE LOS DISPOSITIVOS OPTO-ELECTRONICOS

#### Introducción:

La tecnología de semiconductores produce las más adecuadas fuentes ópticas y fotodetectores. Los componentes de tecnología de semiconductores son rápidos, pequeños, fáciles de interactuar con circuitos electrónicos y aparte son los dispositivos mas efectivos respecto a costo en el mercado.

Se prestara atención en las características claves de los LED y fotodetectores como son el ancho de banda o velocidad. El ancho de banda es una medida de tasa de transferencia de datos que puede ser definido por el tiempo de subida, tiempo de bajada y frecuencia a 3 dB. Mientras mas pequeños los tiempos de subida y bajada, mayor será el ancho de banda de estos.

### **Objetivos:**

- En esta práctica se adquirirá destreza en la medición de tiempos de subida y bajada en los diferentes elementos transductores de luz.
- Se combinará diferentes arreglos de foto-transmisores y foto-detectores, observando que arreglo o que elemento es más eficiente de acuerdo a la conveniencia de la aplicación a implementar.
- Se aprenderá a medir el ancho de banda de un sistema transmisor óptico usando el método de Wobulación.

### **Materiales requeridos**

- Fototransistor.
- 74LS05, inversor con colector abierto TTL.
- Resistencias de  $47 \Omega$  (2).
- LED infrarrojo.
- LED rojo.
- Fotodiodo.
- Fotodarlington.
- 1 metro de fibra  $1000 \mu\text{m}$ .
- Resistencias de  $150 \Omega$  (2).
- Resistencia de  $10 \text{ k} \Omega$ .
- Osciloscopio.
- Generador de Funciones.
- Fuente Variable de Voltaje.

### **Procedimiento #1: Foto-detectores**

1. Ensamblar el circuito mostrado en la Figura 5.1. Nótese que las 5 entradas como salidas están en paralelo, pero están dibujadas como una sola. No conectar el generador de señales en ninguno de los pines de entrada del 74LS05 aún.

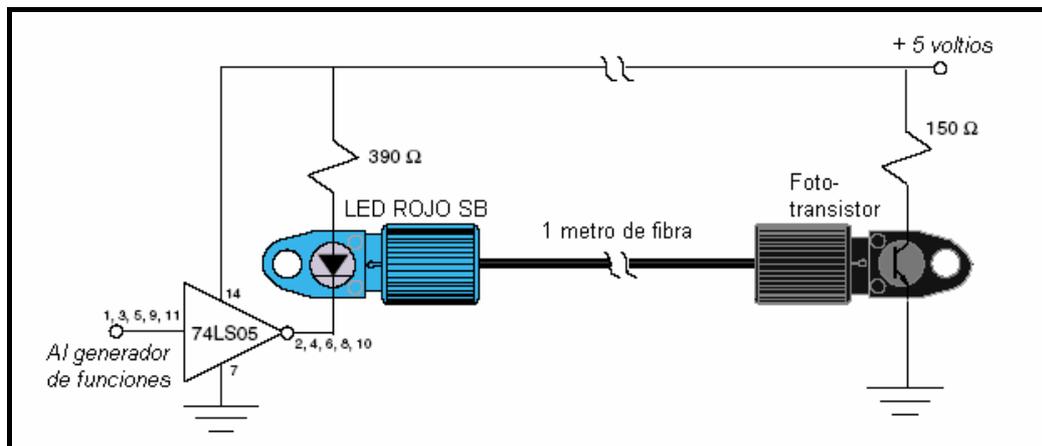


Figura 5.1. Circuito de medición de tiempos de subida y bajada usando varias fuentes de luz y foto-detectores.

2. La práctica empieza usando el LED rojo como fuente emisora de luz (Figura 5.1). Como foto-detector tendremos un fototransistor.
3. Inserte los extremos del metro de fibra en los respectivos conectores que poseen ya adaptado el LED rojo como el fototransistor del otro. Presione el cable dentro del conector hasta que tope el micro lente, luego ajuste la rosca hasta asegurar que la fibra quede asegurada.
4. Encienda el generador de funciones y el osciloscopio. Ajuste tanto las divisiones en tiempo como en amplitud en el osciloscopio de tal forma que pueda apreciar la amplitud y la frecuencia de la señal a la salida del generador de funciones.
5. Ajuste la frecuencia del generador de funciones en 10 KHz. para una señal simétrica cuadrada TTL. Verifique la frecuencia con el osciloscopio. Observe los tiempos de subida y de bajada de la señal producida por el generador de funciones. Los tiempos de subida y de bajada de la señal producida por el generador de funciones debe ser menor a 50 nanosegundos.
6. El generador de funciones debe tener niveles TTL (Voltaje en alto entre 3,4 y 5,0 voltios. Voltajes en bajo entre 0 y 0,7 voltios). Verifique las amplitudes con el osciloscopio.
7. Encienda la fuente variable de voltaje y ajuste su salida a 5 voltios DC.
8. Conecte la salida del generador de funciones a los pines 1, 3, 5, 9 y 11 del 74LS05.
9. Verifique que el 74LS05 está manejando al LED apropiadamente. Hágalo observando en el osciloscopio la señal que presenta el pin 2 del inversor 74LS05.

10. Conecte la otra punta del osciloscopio entre el colector del fototransistor y la resistencia de 150  $\Omega$ . El voltaje observado en el osciloscopio debe estar en fase con el mostrado en el pin dos del inversor 74LS05 e invertido con el entregado por el generador de funciones.
11. Expanda las divisiones tanto en tiempo como en amplitud en el osciloscopio para medir el tiempo de subida en el colector del fototransistor. Registre el tiempo de subida en la Tabla 5.1. El tiempo de subida y de bajada se lo mide entre el 10 y 90 % del valor pico de la señal.
12. Ajuste el osciloscopio de tal forma que pueda medir el tiempo de bajada del fototransistor; luego registre ese tiempo en la Tabla 5.1.
13. Apague el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
14. Reemplace el fototransistor por el foto-darlington. Reemplace la resistencia de 150  $\Omega$  conectada al colector del fototransistor por una de 47  $\Omega$ .
15. Encienda el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
16. Reduzca la frecuencia del generador de funciones a 1KHz.
17. Ajuste las divisiones tanto en tiempo como en amplitud en el osciloscopio para medir el tiempo de subida en el colector del foto-darlington. Registre los tiempos en la Tabla 5.1.
18. Apague el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
19. Retire la resistencia de 47  $\Omega$  y conecte una de 10 k $\Omega$  a la tierra del circuito. Reemplace el foto-darlington por el fotodiodo. Conecte el cátodo del Fotodiodo a +5V y el ánodo a la resistencia de 10 k $\Omega$ .
20. Encienda el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
21. Aumente la frecuencia de operación el generador de funciones a 100 KHz.
22. Con el osciloscopio, mida los tiempos de subida y de bajada entre la resistencia de 10 k $\Omega$  y el ánodo del fotodiodo. Registre los tiempos en la Tabla 5.1.
23. Apague el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.

<b>Foto-detector</b>	<b>Tiempo de subida</b>	<b>Tiempo de bajada</b>
Fototransistor		
Fotodarlington		
Fotodiodo		

Tabla 5.1. Valores de tiempos de subida y bajada, con un LED rojo como fuente óptica

## Procedimiento #2: LED

1. Copie las mediciones del fotodiodo de la Tabla 5.1 en la Tabla 5.2.
2. Reemplace el LED rojo por el LED infrarrojo. Asegúrese que la fibra y el conector queden bien acoplados.
3. Encienda el generador de funciones (100 KHz.) y la fuente variable de voltaje.
4. Ajuste las divisiones tanto en tiempo como en amplitud en el osciloscopio para medir el tiempo de subida y de bajada del LED infrarrojo. Registre las mediciones en la Tabla 5.2.
5. Apague el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
6. Retire el LED infrarrojo del circuito.
7. Inserte el LED verde en el circuito.
8. Reemplace la resistencia de  $150 \Omega$  (en serie con la fuente variable de voltaje +5V y el LED verde) por una resistencia de  $47 \Omega$ .
9. Encienda la fuente variable de voltaje y el generador de señales.
10. Ajuste la frecuencia del generador de funciones a 10 KHz.
11. Mida el tiempo de subida y bajada en el ánodo del fotodiodo usando el osciloscopio. Registre los resultados en la Tabla 5.2.
12. Apague el generador de funciones y la fuente variable de voltaje.
13. Retire el LED verde del circuito y reemplácelo por el LED IR.
14. Guarde los materiales usados.

LED	Tiempo de subida	Tiempo de bajada
Rojo		
Verde		
Infrarrojo		

Tabla 5.2. Valores de tiempos de subida y bajada, usando un fotodiodo como receptor óptico.

## Análisis y Preguntas

¿Cuál de los foto-detectores analizados en la Tabla 5.1. tiene el tiempo de subida y de bajada más rápido?

¿Existieron detectores, según lo registrado en la Tabla 5.1., con tiempos de subida y bajada considerablemente diferentes? ¿Cuáles?

El ancho de banda a la frecuencia 3dB en alta del circuito puede ser determinado con el tiempo de subida o el tiempo de bajada, usando la ecuación

$$f_{3dB} = 0.35 / T_r$$

$T_r$  – tiempo de subida, 10 al 90%

$f_{3dB}$  – 3 dB ancho de banda en Hertzios.

Copie los tiempos de subida y de bajada del foto-detector registrados en la Tabla 5.1 en la Tabla 5.3.

Tomando el mayor de entre los tiempos de subida o de bajada de cada detector, calcule el ancho de banda a la frecuencia 3dB y regístrela en la columna 4 de la Tabla 5.3.

<b>Detector</b>	<b>Tiempo de subida</b>	<b>Tiempo de bajada</b>	<b><math>f_{3dB}</math></b>
Fototransistor			
Fotodarlington			
Fotodiodo			

Tabla 5.3. Cálculo del ancho de banda del detector usando un LED rojo como fuente óptica.

¿Cuál de los foto-detectores tiene el mayor ancho de banda?

Copie los tiempos de subida y de bajada del puntero óptico registrados en la Tabla 5.2. a la Tabla 5.4.

Tomando el mayor de entre los tiempos de subida o de bajada de cada fuente emisora de luz, calcule el ancho de banda a la frecuencia 3dB y regístrela en la columna 4 de la Tabla 5.4.

<b>LED</b>	<b>Tiempo de subida</b>	<b>Tiempo de bajada</b>	<b><math>f_{3dB}</math></b>
Rojo			

Verde			
Infrarrojo			

Tabla 5.4. Cálculo del ancho de banda del emisor usando un fotodiodo como detector óptico.

¿Cuál LED es más rápido según la **Tabla 5.4**? ¿Era lo que esperaba? ¿Por qué?

## Práctica # 6

### TRANSMISORES DE FIBRA OPTICA

#### Introducción:

Como ya se estudio, todos los sistemas de fibra óptica constan de tres elementos principales:

- ◆ Transmisor
- ◆ Receptor
- ◆ Fibra óptica

La siguiente figura retrata un esquema de los elementos principales.

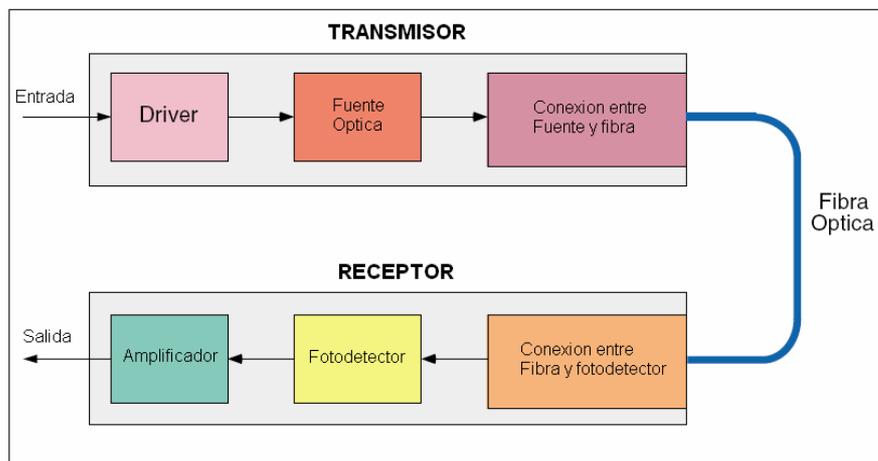


Figura 6.1 Esquema de elementos principales de un sistema de fibra óptica

El transmisor y receptor contienen pequeños elementos o bloques. Hasta ahora en las prácticas anteriores se experimentó con fibra óptica, LED y fotodetectores. En esta actividad se investigará uno de los dos últimos elementos en el sistema de fibra óptica, el driver de la fuente de luz. Como ya se ha estudiado, las fuentes ópticas más comunes que se usan en sistemas de fibra óptica son los LED y los diodos LASER. Los drivers de esta actividad usan LED. Los que usan LD pueden ser más costosos y necesitan incluso consideraciones de seguridad.

### Objetivos:

- Experimentar con los principales modelos de transmisión: digitales y análogos.
- Medir características importantes en los fotoemisores con diferentes condiciones de transmisión, tales como: corrientes de penumbra, corrientes y voltaje de polarización, etc.
- Escoger esquemas apropiados de acuerdo a los requerimientos de implementación.

### Materiales requeridos:

- LED rojo.
- Transistor PN2222.

- Transistor MPS3638A.
- Resistencia de 47  $\Omega$ .
- Resistencias de 470  $\Omega$  (2).
- Resistores.
- Capacitares 0,01  $\mu\text{F}$ .
- Resistores de 1 K $\Omega$  (2).
- Capacitor de 100 pF.
- Diodos 1N914 (3).
- Transistores 2N3904.
- 74LS05, inversor con colector abierto TTL.
- Resistencia de 220  $\Omega$ .
- Generador de Funciones.
- Multímetro.
- Osciloscopio.
- Fuente Variable de Voltaje.

### **Procedimiento #1: Circuitos Digitales**

La palabra “digital” en fibras ópticas tiene el mismo significado que tiene en el mundo de la electrónica. Puertas, circuitos o sistemas digitales son aquellos en los que únicamente existen dos estados definidos. Un “alto” o 1 lógico y “bajo” o 0 lógico. En todo sistema digital un “bajo” o 0 lógico no necesariamente significa 0 voltios o ausencia de señal óptica. Un 0 lógico significa un estado bajo en comparación con el 1 lógico.

En la industria electrónica, las definiciones de 1 lógico o 0 lógico están enmarcadas dentro de una familia lógica. Por ejemplo, la familia lógica TTL maneja niveles altos comprendidos entre los 2 y los 5 voltios, mientras que para niveles bajos voltajes entre los 0 y 0,8 voltios.

Un circuito electrónico simple que puede ser conectado a cualquier salida TTL como CMOS para manejar un LED se muestra en la Figura 6.2. Este diseño maneja un LED con una corriente por encima de los 50 mA. y frecuencias en el orden de los Megahercios.

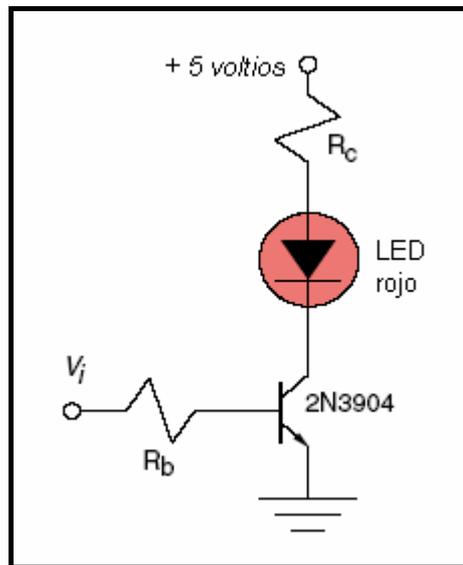


Figura 6.2 Circuito conmutador con un transistor NPN que maneja un LED transmisor de fibra óptica.

1. Calcule el valor de la resistencia  $R_c$ , para que maneje una corriente de 20 mA. en el LED (Figura 6.2) cuando el transistor está en saturación. Asuma un  $V_{ce}$  de 0,2 voltios y una caída de tensión en el LED de 1,8 voltios.
2. Calcule el máximo valor para la resistencia de base  $R_b$ , necesaria para manejar al transistor en saturación si  $V_i$  está conectado a +5 voltios. Asuma un  $V_{be}$  de 0,7 voltios y un  $h_{fe}$  de 50.
3. Seleccione del kit la resistencia más próxima a la calculada para  $R_c$  y la mitad de la calculada para  $R_b$ . Vea la Tabla 6.1. para la selección.
4. Arme el circuito como lo muestra la Figura 6.2.
5. Encienda la fuente variable de voltaje y ajuste para una salida de +5 voltios DC.
6. Conecte  $R_b$  a  $V_i = +5$  voltios. El LED rojo debe encenderse. De lo contrario, verifique la fuente de voltaje o las conexiones eléctricas.
7. Con el multímetro mida el voltaje colector-emisor y la caída de voltaje en el LED; luego registre las mediciones en la Tabla 6.1.
8. Cambie  $V_i$  de +5 voltios a tierra. El LED deberá ahora apagarse.
9. Con el multímetro, mida el voltaje colector-emisor del transistor y registre el resultado en la Tabla 6.1.
10. Encienda el generador de funciones y seleccione una señal cuadrada simétrica con una frecuencia de 100 KHz. y un voltaje en alto entre 3,4 y 5 voltios, y uno en bajo entre 0 y 0,7 voltios (TTL). Verifique la amplitud y la frecuencia con el osciloscopio.
11. Desconecte  $V_i$  de tierra y conéctelo al generador de funciones.

12. Usando el osciloscopio mida los tiempos de subida y de bajada del circuito manejador del LED en el colector del transistor 2N3904. Registre los resultados en la Tabla 6.1.
13. Incremente la frecuencia del generador de funciones hasta que la señal digital en el colector del transistor se reduzca al 70 % de su valor pico. Mida el período de la frecuencia y regístrelo en la Tabla 6.1.
14. Apague el Generador de Funciones y la Fuente Variable de Voltaje.

Medida	Datos
Vce (LED on)	
Vf (LED)	
Vce (LED off)	
Tiempo de subida	
Tiempo de bajada	
Período a 3 dB	

Tabla 6.1. Medidas tomadas del circuito de la Figura 6.29.

Los sistemas de comunicación de fibra óptica son en su mayoría dualizados en sus diseños, es decir, tienen en su tarjeta electrónica los módulos transmisor y receptor el uno junto al otro. La corriente que maneja el encendido y el apagado del LED puede causar rizados en la fuente de voltaje o generar ruido que pudieren afectar al módulo receptor que se encuentra contiguo. El manejar el LED con un diseño PUSH-PULL ayuda a disminuir el efecto del rizado en la fuente de voltaje. La Figura 4.13 es una adaptación para el de la Figura 6.2. que funciona exactamente de la misma manera.

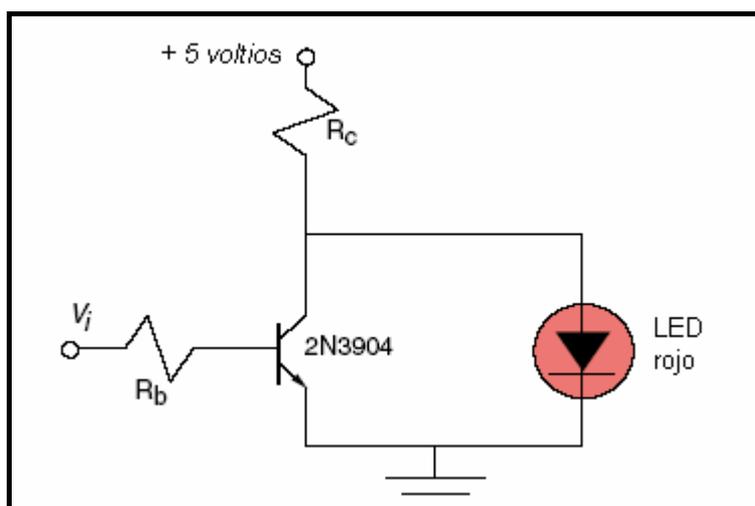


Figura 6.3. Circuito desviador conmutador que maneja un LED transmisor de fibra óptica, que puede reducir los rizados causados por las fuentes de voltaje.

15. Reacomode los componentes de tal forma que quede el circuito mostrado en la Figura 6.3.
16. Encienda la fuente variable de voltaje. Conecte la resistencia  $R_b$  a un  $V_i$  de +5 voltios.
17. Con el multímetro mida el voltaje  $V_{ce}$  y regístrelo en la Tabla 6.2.
18. Cambie  $V_i$  de +5V a tierra. El LED rojo no debe encender.
19. Registre la caída de voltaje en el LED rojo y registre este valor  $V_f$  en la Tabla 6.2.
20. Encienda el generador de funciones y ajústelo hasta obtener una onda cuadrada simétrica con una frecuencia de 100 KHz. TTL.
21. Desconecte  $V_i$  de tierra y conéctelo a la salida del generador de funciones.
22. Con el osciloscopio mida el tiempo de subida y de bajada del circuito manejador del LED en el colector del transistor 2N3904. Registre los resultados en la Tabla 6.2.
23. Aumente la frecuencia del generador de funciones hasta que la señal digital en el colector del transistor decrezca hasta un 70 % de su valor pico. Mida el período de la frecuencia y regístrela en la Tabla 6.2.
24. Apague la fuente variable de voltaje y el generador de funciones. Desconecte el generador de funciones.

Medida	Datos
$V_{ce}$	
$V_f$	
Tiempo de subida	
Tiempo de bajada	
Período a 3 dB	

Tabla 6.2. Medidas tomadas del circuito mostrado en la Figura 6.3.

## Procedimiento #2: Circuitos Digitales II (Opcional)

1. Reemplace el circuito usado en el procedimiento anterior por el mostrado en la Figura 6.4. Utilice el mismo valor de  $R_c$  usado en el Procedimiento #1.
2. Realice los pasos necesarios para medir los datos requeridos en la Tabla 6.3.

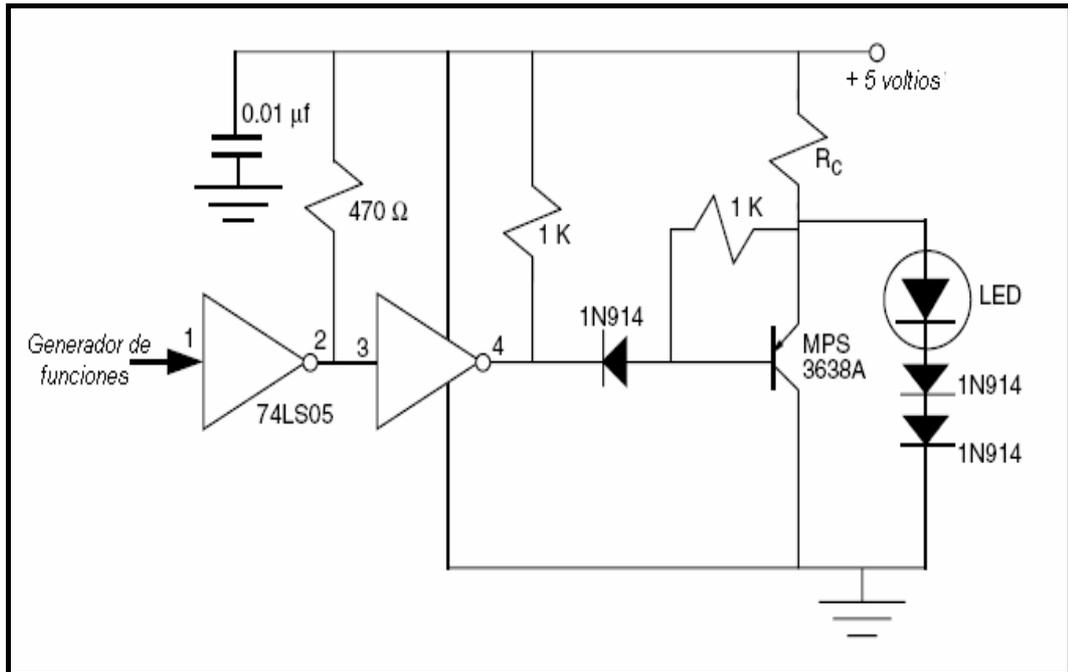


Figura 6.4. Circuito transmisor de 10 Mega bits PUSH-PULL

Medida	Datos
Vce (LED on)	
Vce (LED off)	
Tiempo de subida	
Tiempo de bajada	
Período a 3 dB	

Tabla 6.3. Medidas tomadas de circuito de alta velocidad de la Figura 6.4.

### Procedimiento #3: Circuitos Analógicos

A pesar que la mayoría de los sistemas ópticos son digitales, hay unas cuantas aplicaciones analógicas. El diseño de un circuito para LED en un sistema analógico de fibras ópticas es similar al diseño de un amplificador clase A. Debe tener un ancho de banda adecuado y buena linealidad. Un circuito apropiado para manejar un LED en aplicaciones de video a color es mostrado en la Figura 6.5 (El video a color requiere de 8 MHz de ancho de banda y tiene un voltaje pico a pico estándar de 1 voltio).

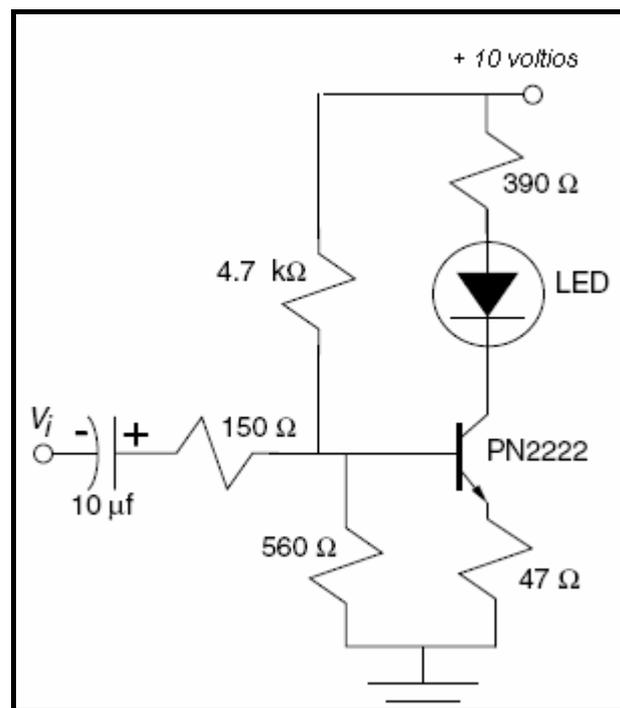


Figura 6.5 Transmisor análogo de fibra óptica.

1. Reemplace el circuito del procedimiento anterior por el mostrado en la Figura 6.5.
2. Encienda la fuente variable de voltaje y ajuste el voltaje de salida a +10 voltios DC.
3. Con  $V_i$  abierto, mida con el multímetro la corriente que pasa por el LED y registre este valor en la Tabla 6.4.
4. Encienda el generador de funciones. Ajústelo hasta producir una señal sinusoidal de 0,5 voltios pico a pico a 10 KHz. Revise la frecuencia y la amplitud con el osciloscopio.
5. Conecte la salida del generador de funciones a  $V_i$  y reajuste la amplitud de la misma de ser necesario.

6. Observe la onda seno con el osciloscopio en el colector del transistor PN2222. Registre la amplitud del voltaje pico a pico y regístrela en la Tabla 6.4.
7. Mientras observa la onda del colector del transistor, aumente la amplitud de la señal a la salida del generador de funciones hasta que la onda sinusoidal empiece a distorsionarse. Registre el valor del voltaje pico a pico en la Tabla 6.4.
8. Con el osciloscopio mida el voltaje pico a pico de  $V_i$  que generó la distorsión producida en el paso 7. Registre este valor en la Tabla 4.22.
9. Regrese la amplitud de la señal a la salida del generador de funciones a 0,5 voltios pico a pico.
10. Manténgase monitoreando el voltaje pico a pico de la señal presente en el colector del transistor, mientras tanto empiece a aumentar la frecuencia de la señal a la salida del generador de funciones y una vez que la amplitud de la señal presente en el colector del PN2222 decrezca al 70 % de su valor pico deténgase y registre aquel valor de frecuencia en la Tabla 6.4.
11. Apague la fuente variable de voltaje, el osciloscopio y el generador de funciones.
12. Guarde los materiales usados.

• <b>Medida</b>	• <b>Datos</b>
• $I_c$	•
• $V_c$ (entrada 0.5 V)	•
• $V_c$ (distorsionado)	•
• $V_i$ (distorsionao)	•
• Período 3db	•

Tabla 6.4 Datos medidos para el driver analógico de la figura 6.5

### **Análisis y Preguntas**

El voltaje medido en el colector del transistor del 2N3904 de la Figura 6.2 para el LED “encendido” y “apagado” es comparable con aquello que usted esperaba? ¿Por qué sí o Por qué no?

Con el LED “encendido” en la Figura 6.2 calcule la corriente de “encendido” usando los datos medidos en esta práctica para  $V_{ce}$  (saturación) y  $V_f$ .

Usando el tiempo de subida medido de la Tabla 6.1, calcule el ancho de banda a la frecuencia 3 dB para el circuito mostrado en la Figura 6.2.

$$f_{3dB} = 0.35 / \tau_r$$

$\tau_r$  – tiempo de subida, 10 al 90%

$f_{3dB}$  – 3 dB ancho de banda en Hertzios.

¿Es comparable la frecuencia 3 dB calculada con la frecuencia medida?

Calcule la corriente promedio usada por el circuito en la Figura 6.2, asumiendo que se lo maneja al 50 % del ciclo total de trabajo (duty cycle).

Usando el valor medido para  $V_f$ , calcule la corriente por el LED en la Figura 6.3.

Calcule la corriente por el 2N3904 en la Figura 6.3 cuando el LED está “encendido” y “apagado”.

Cuál es la corriente promedio en el circuito mostrado en la Figura 4.13, asumiendo que está siendo manejado al 50 % del ciclo total de trabajo (duty cycle).

Comparando la corriente pico y la corriente promedio para el circuito en la Figura 6.2 y 6.3, cual causaría un mayor rizado en la fuente de poder? ¿Cuánto?

Asumiendo un  $h_{fe}$  de 100 para el PN2222, calcule la corriente DC para el LED dibujada para el circuito de la Figura 6.5 sin señal de ingreso.

Cuál es el máximo voltaje lineal del circuito mostrado en la Figura 6.5 (determine su respuesta de los datos empíricos).

Cuál es la frecuencia 3dB para el circuito mostrado en la Figura 6.5?

## **Práctica # 7**

### **DISEÑO DE AMPLIFICADORES DE TRANSIMPEDANCIA PARA RECEPTORES.**

#### **Introducción:**

El fotodiodo, fototransistor y fotodarlington son todos detectores de fotones. Cuando los fotones de la luz son absorbidos por los detectores en la zona activa, electrones y huecos son producidos. Estos electrones y huecos

causan el flujo de corriente en el dispositivo si es que este se encuentra polarizado.

En la mayoría de los casos las señales electrónicas son desarrolladas como voltajes y no como corrientes. Como las señales de voltaje son las más usadas en electrónica, el amplificador de un receptor de fibra óptica debe convertir la corriente que emite el foto-detector en voltaje. A los amplificadores con este tipo de función de transferencia se les llama amplificadores de transimpedancia.

El amplificador de transimpedancia es talvez el dispositivo más sensible del sistema de recepción. Ya que el amplificador debe transformar pequeñas corrientes a voltajes.

En esta actividad se construirá y caracterizara algunos circuitos básicos de transimpedancia.

### **Objetivos:**

- En esta actividad se construirá y caracterizará algunos amplificadores de recepción de transimpedancia..
- Se evolucionará usando modelos simples para entender su funcionamiento y se revisará modelos más complejos usando la mayoría de fotorreceptores conocidos.
- Se aprenderá sobre el efecto que tienen las cargas parásitas sobre los receptores y la eficiencia de los amplificadores de transimpedancia.

### **Materiales requeridos:**

- LED infrarrojo.
- Inversor 74LS05.
- Resistor de 100  $\Omega$ .
- Resistor de 10  $\Omega$ .
- Resistor de 47  $\Omega$ .
- PN 2222.
- LM741
- Fibra óptica 1 metro de largo.
- Resistor de 560  $\Omega$ .

- Fotodiodo.
- Resistor de 10 kΩ.
- Resistor de 100 kΩ.
- 2 transistores 2n3904.
- Capacitor de 0.01 μf.
- Multímetro.
- Osciloscopio.
- Generador de funciones.
- Fuente de voltaje.

### Procedimiento #1: Función de Transimpedancia básica.

El diseño más simple de un amplificador de transimpedancia es sólo un resistor. Su salida es medida en voltios por amperio. Un arreglo de un fotodiodo y un resistor es mostrado en la Figura 7.1. La función de transferencia de este circuito receptor es:

$$V_o = P_i \cdot \mathcal{R} \cdot R_x$$

$P_i$ : Potencia óptica incidente hacia el fotodiodo.

$\mathcal{R}$ : Respuesta del fotodetector.

$R_x$ : Valor del resistor, ohmios.

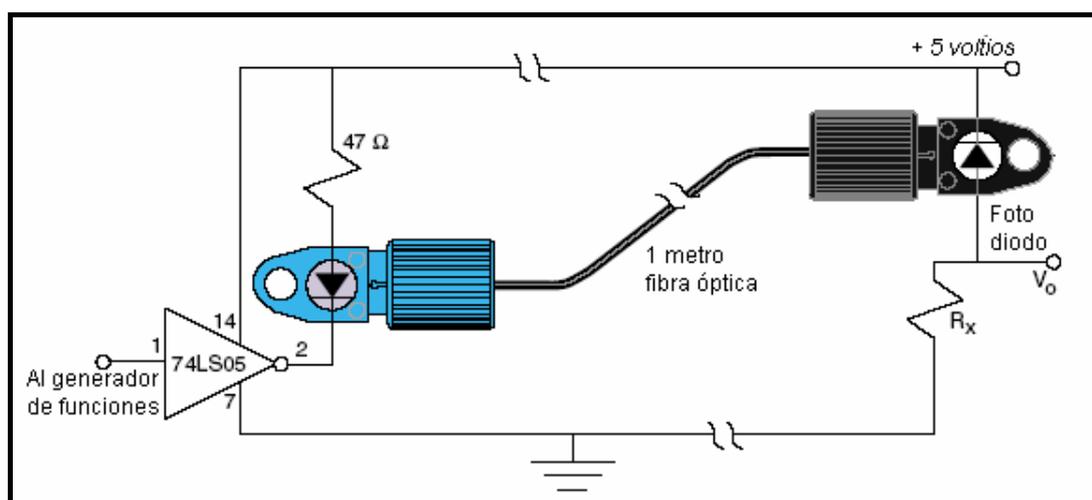


Figura 7.1 Arreglo de receptor fotodiodo-resistor.

1. Construya el circuito mostrado en la Figura 7.1. Empiece con el resistor  $R_x$  en un valor de 100 k $\Omega$ .
2. Encienda la fuente de poder y ajuste el voltaje de salida a + 5 voltios DC.
3. Encienda el generador de funciones y el osciloscopio.
4. Ajuste el generador para producir una señal cuadrada simétrica con una frecuencia de 10 KHz y una amplitud TTL como sigue ( $3,4 \text{ V} < \text{Voltio} < 5,0 \text{ V}$  y  $0 \text{ V} < 0,7 \text{ V}$ ). Observe la frecuencia y la amplitud con el osciloscopio.
5. Conecte la salida del generador de funciones al pin 1 del 74LSS05.
6. En el osciloscopio observe la señal en el nodo marcado con  $V_o$ . (Entre el fotodiodo y el resistor,  $R_x$ )
7. Ajuste el osciloscopio de tal forma que puede medir el voltaje pico – pico y el tiempo de subida y el de bajada de  $V_o$ . Registre las medidas en la Tabla 7.1.
8. Apague el generador de funciones y la fuente de poder.
9. Reemplace el resistor de 100 k $\Omega$  por uno de 47 k $\Omega$ .
10. Encienda la fuente de poder y el generador de funciones, mida el  $V_{p-p}$ ,  $t_r$  y  $t_f$  en  $V_o$  con el osciloscopio y registre los resultados en la Tabla 7.1.
11. Repita los pasos 8 al 10, reemplazando el resistor de 47 k $\Omega$  con uno de 10 k $\Omega$ .
12. Coloque un capacitor de 0,001 uF en paralelo con el de 10 k $\Omega$
13. Ajuste el osciloscopio y el Generador de Funciones para medir el  $V_{p-p}$ , tiempo de subida y el tiempo de bajado en  $V_o$ . Registre estas medias en la Tabla 7.1.
14. Apague el Generador de Funciones y la Fuente de Poder.

<b>R<sub>x</sub></b>	<b>V<sub>p-p</sub></b>	<b>t. subida</b>	<b>t. bajada</b>
100 k $\Omega$			
47 k $\Omega$			
10 k $\Omega$			
10 k $\Omega$    .001 uF.			

Tabla 7.1. Medidas de parámetros para varios valores de resistencias,  $R_x$ , en el circuito de la Figura 7.1.

El resistor de transimpedancia usado como receptor de fibra óptica tiene dos principales particularidades. La primera es que la impedancia de la carga debe ser alta, comparada con  $R_x$ , o la ganancia del receptor baja. La segunda es que la capacitancia de la carga puede considerablemente afectar el ancho de banda del circuito, como se lo puede apreciar en la ecuación.

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_x (C_d + C_r + C_l)}$$

- $R_x$ : Valor de la resistencia.  
 $C_d$ : Capacitancia del foto-detector.  
 $C_r$ : Capacitancia del Resistor,  $R_x$ .  
 $C_l$ : Capacitancia de la carga.

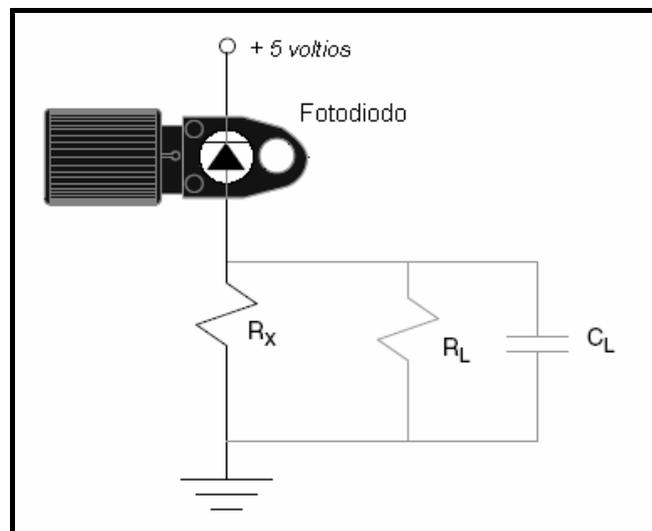


Figura 7.2. Receptor mostrando una carga y una capacitancia parásita.

## Procedimiento #2: Amplificadores Operacionales

Afortunadamente hay receptores de fibras ópticas mucho mejores que el formado por el fotodiodo y un simple resistor. Un ejemplo, es un diseño de amplificador operaciones mostrado en la Figura 7.3. Su principal ventaja sobre los circuitos anteriores es que el amplificador operacional almacena la impedancia de carga proveniente de la transimpedancia del resistor de ganancia,  $R_x$ . La ganancia del receptor sigue determinada por el resistor retroalimentado y la frecuencia 3 dB por las capacitancias en las terminales del amplificador operacional invertido.

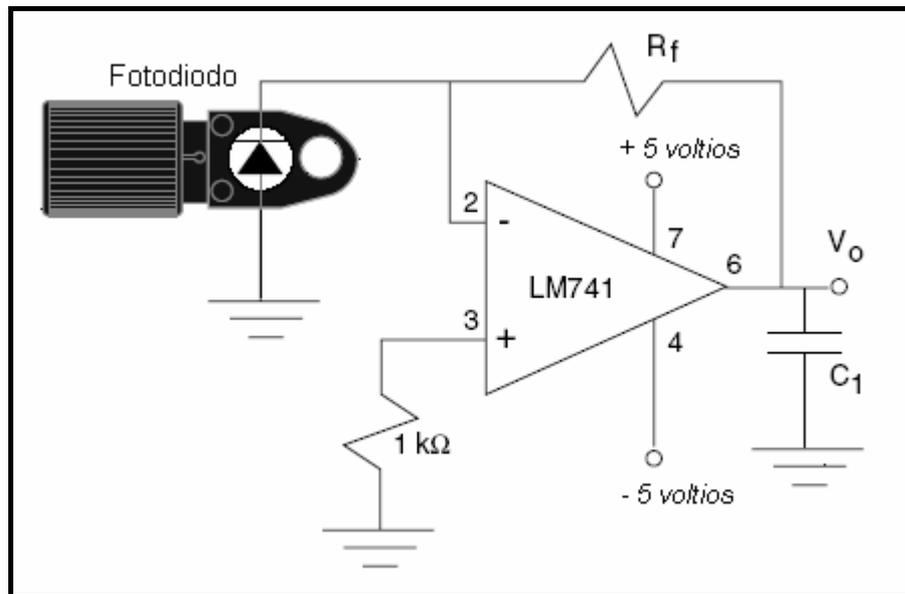


Figura 7.3 Receptor de fibra óptica no invertido usando un OPAM.

1. Reemplace el resistor usado en el diseño anterior con el circuito mostrado en la Figura 7.3 (Ignore  $C_1$  por ahora).
2. Encienda la fuente de poder y ajuste su salida para proveer de un voltaje de  $+ / - 5$  voltios DC.
3. Encienda el Generador de Funciones.
4. Para los tres valores de  $R_f$  listados en la Tabla 7.2 mida  $V_{p-p}$ , tiempos de subida y bajada con un osciloscopio. Registre los resultados medidos en la Tabla 7.2.
5. Ubique el un extremo del capacitor de  $0,001 \mu\text{F}$  ( $C_1$ ) a la salida del amplificador operacional y el otro extremo a tierra como el mostrado en la Figura 7.3.
6. Registre en la última fila de la Tabla 7.2  $V_{p-p}$ , tiempo de subida y tiempo de bajada de este circuito receptor con la capacitancia de carga añadida.
7. Apague el Generador de Funciones y la Fuente de Poder.

$R_f$	$V_{p-p}$	t. subida	t. bajada
100 k $\Omega$			
47 k $\Omega$			
10 k $\Omega$			
10 k $\Omega$    .001 $\mu\text{F}$ .			

Tabla 7.2 Datos de medidos para diferentes valores de  $R_f$ .

### Procedimiento #3: Diseños Discretos

A pesar que los amplificadores operacionales están disponibles y son fáciles de usar, ellos de vez en cuando no sintonizan el ancho de banda de frecuencias requeridas en algunas aplicaciones. Para estas aplicaciones, amplificadores de transistores discretos son muy usualmente la solución. Ejemplos de dos circuitos amplificadores discretos de transistores bipolares se muestran en la Figura 7.4.

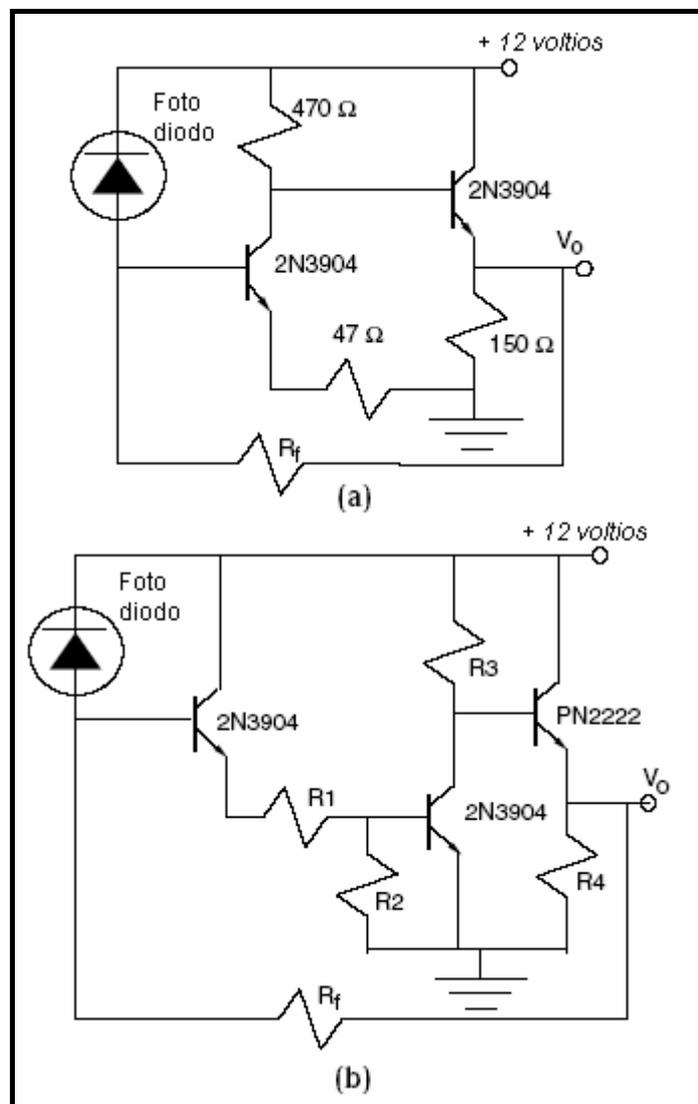


Figura 7.4. Receptores de fibra óptica usando transistores bipolares discretos.

1. Reemplace el amplificador operacional y todos los circuitos asociados por el mostrado en la Figura 7.4. (a).
2. Encienda la Fuente de Poder y ajuste la salida conectada al receptor con transistor discreto a +5 V DC.
3. Encienda el Generador de Funciones.
4. Mida el  $V_{p-p}$ , tiempo de subida y tiempo de bajada con un osciloscopio para valores de  $R_f$  definidos en la Tabla 7.3. Registre los resultados.
5. Apague el Generador de Funciones y la Fuente de Poder.

<b>Rf</b>	<b>Vp-p</b>	<b>t. subida</b>	<b>t. bajada</b>
100 k $\Omega$			
47 k $\Omega$			
10 k $\Omega$			
10 k $\Omega$    .001 $\mu$ F.			

Tabla 7.3. Medidas de parámetros para varios valores de resistencias,  $R_f$ , en el circuito de la Figura 7.4.

Para lograr un alto ancho de banda de frecuencia y ruido eléctrico bajo, los diseños discretos hacen uso de verdaderos trabajos artísticos para la construcción de transistores y técnicas de miniaturización de circuitos para reducir el tamaño de empaquetamiento tanto como sea posible. Muy a menudo, estos circuitos son construidos usando transistores desnudos (solo el semiconductor, sin empaquetamiento), resistores y capacitores.

#### **Procedimiento #4: Receptores Fototransistores y Fotodarlington**

Los fototransistores y fotodarlingtonson son grandes detectores para aplicaciones de baja velocidad y sus receptores son en su mayoría diseñados por simplicidad. Ejemplos de amplificadores para detectores de fototransistor o un fotodarlington son mostrados en las Figuras 7.5. (a) y (b). Aplicaciones típicas de estos receptores se ven en juegos y controles de motores, entre otros.

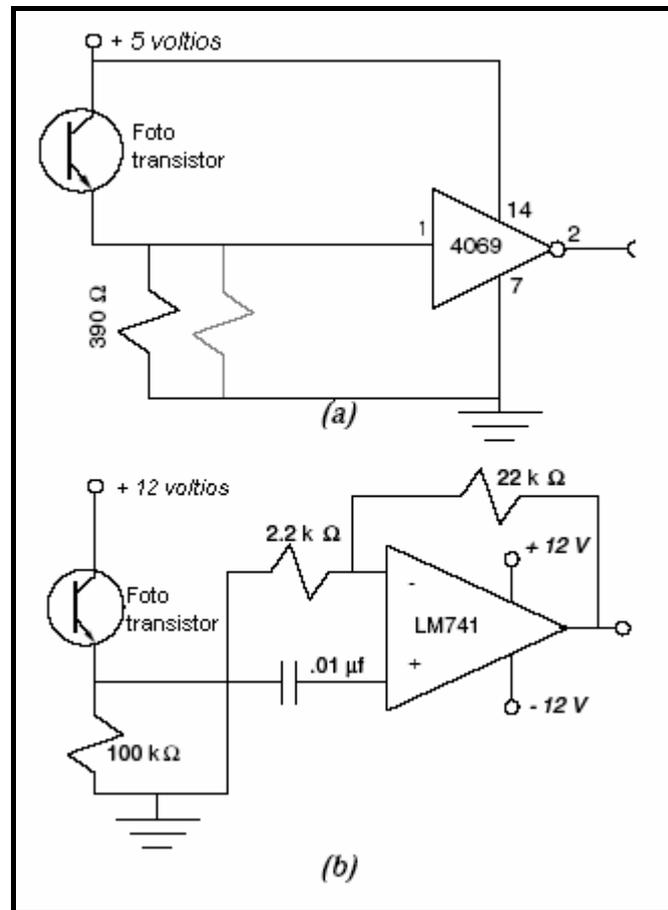


Figura 7.5. (a) Receptor inversor con fototransistor CMOS; (b) Receptor no invertido con amplificador acoplado AC.

1. Reemplace el fotodiodo por el fototransistor. Reemplace el resistor de  $47\ \Omega$  en la Figura 7.1 con un resistor de  $100\ \Omega$ .
2. Retire el circuito del receptor anterior y reemplácela con el circuito mostrado en la Figura 7.5.
3. Encienda la fuente de poder y ajuste el voltaje de salida a  $+5\ \text{V DC}$ .
4. Encienda el Generador de Funciones.
5. Observe la señal en el emisor del fototransistor con un osciloscopio. Registre  $V_{p-p}$ , tiempo de subida y tiempo de bajada en la Tabla 4.25.
6. Mida  $V_{p-p}$ , tiempo de subida y tiempo de bajada en el pin 2 de la puerta lógica 4069 y regístrelo en la Tabla 7.4.
7. Coloque valores más bajos de resistores en paralelo con los  $390\ \Omega$  mostrados en la Figura 7.5(a) hasta que la salida del 4069 sea una

señal periódica. Registre debajo el valor del resistor equivalente que retira la señal periódica en el pin 2 del 4069.

R=

8. Apague la fuente de poder en el generador de funciones.
9. Reemplace el fototransistor en el diseño por un fotodarlington.
10. Encienda la Fuente de Poder y el Generador de Funciones.
11. Nuevamente coloque pequeños valores de resistores en paralelo con el resistor de  $390\ \Omega$  hasta que la señal periódica ya no esté presente a la salida del 4069. Registre debajo el valor de la resistencia equivalente que desaparece la señal periódica en el pin 2 del 4069.

R=

12. Apague la fuente de poder y el generador de funciones.
13. Guarde los materiales usados.

Punto de medición	Vp-p	t. subida	t. bajada
V emitter			
V 4069			

Tabla 7.4. Medidas de parámetros para la resistencia Rf en circuito mostrado en la Figura 7.5.

### Análisis y Preguntas.

Que sucede con los tiempos de subida y bajada en el receptor cuando los valores de resistencias disminuyen en la Figura 7.1? ¿Qué pasa con el voltaje pico a pico?

Los tiempos de subida y bajada decrecen a medida que el valor del resistor es reducido, lo que incrementa al ancho de banda. El voltaje pico a pico es reducido.

Que sucede con los tiempos de subida y bajada a través del receptor cuando la capacitancia es añadida en el circuito de la Figura 7.1?

Los tiempos de subida y bajada se incrementan.

## **Práctica # 8**

### **LA FIBRA OPTICA EN SENSORES OPTICOS PASIVOS Y ACTIVOS.**

#### **Introducción:**

Muchas aplicaciones industriales y caseras usan luz o sensores ópticos para varios propósitos. Como ejemplos podemos citar: sistemas de seguridad y luces que automáticamente se prenden cuando un cuarto esta oscuro. En esta demostración se apreciara como la fibra óptica puede ser usada en varios sensores ópticos.

#### **Objetivos:**

- En esta práctica se observara como la fibra óptica puede ser usada con varios tipos de sensores ópticos.
- Se usará las propiedades de la luz para hacer funcionar un simple detector óptico.
- Se reconfigurará el módulo de transmisión-recepción en forma de un sensor óptico activo.

#### **Materiales:**

- Módulo de transmisión/recepción multipropósito.
- 1 metro de fibra óptica (2).
- Diferentes fuentes de luz comunes.

#### **Procedimiento A.**

Muchas aplicaciones industriales y caseras usan sensores lumínicos u ópticos para varios propósitos. Por ejemplo: sistemas de seguridad y luces que se encienden automáticamente cuando un cuarto esta oscuro. En esta práctica se observara como la fibra óptica puede ser usada como varios tipos de sensores ópticos.

1. Tome el receptor de audio, equipado con un metro de fibra óptica y este seguro de que se encuentre debidamente alimentado, listo para funcionar el otro extremo de la fibra, el cual iría al transmisor debe mantenerse libre.
2. Acerque el extremo libre de la fibra a unos 15 centímetros de alguna fuente fluorescente de luz (probablemente necesitara mover el receptor para realizar esta practica, hágalo con cuidado). El sonido que escuchara proveniente del parlante del receptor será el sensor óptico captando la luz fluorescente encendiéndose y apagándose a razón de 120 veces por segundo.
3. Acerque un poco más la fibra hacia la fluorescente y ahora aléjela de ella. Que sucede con el sonido del receptor cuando usted acerca la fibra a la bombilla fluorescente? Por que?
4. Localice una bombilla incandescente de luz. Acerque la fibra hacia ella, directamente a hacia la bombilla a una distancia de 10 centímetros. Escuche el sonido producido por el parlante en el receptor. Describa el sonido cuando se acerca la fibra hacia la bombilla.
5. Encienda la televisión y acerque extremo de la fibra tan cerca como pueda de la pantalla del televisor. Mueva la fibra a diferentes puntos de la pantalla mientras escucha la diferencia entre el tono y el volumen que emite el parlante en el receptor. Describa la amplitud y la frecuencia del sonido en el parlante cuando mueve el extremo de la fibra hacia varios puntos de la pantalla de televisión.
6. Repita el paso anterior con un monitor de computadora. Compare el sonido emitido por el monitor y por la pantalla del televisor.
7. Acerque el extremo libre de la fibra hacia una ventana y apunte con la fibra hacia el sol. Escuche el sonido en el parlante. Ahora apunte la fibra hacia una hoja papel blanca iluminada por el sol. Describa que sucede con el sonido que emite la luz solar en el receptor.

## **Procedimiento B**

En esta parte de la actividad vamos a reconfigurar el Modulo de transmisión-recepción en un sensor óptico activo. El LED transmisor y la fibra conectada en el transmisor nos proveerán una fuente de luz para el sensor. Otra fibra recogerá la luz originada del LED y transportara la luz hacia el foto-detector localizado en el circuito receptor. Este sensor no dependerá del ambiente o la luz externa para funcionar.

El indicador del sensor será el parlante del receptor. Si el receptor está relativamente en silencio significaría que la luz no está entrando en la fibra óptica del receptor.

En los siguientes pasos las fibras estarán posicionadas para detectar la presencia de objetos cerca de los extremos libres de las fibras.

1. Inserte 1 metro de fibra del lado del transmisor hasta que toque con la pared del fototransmisor, dejando el otro extremo libre. A su vez coloque otro metro de fibra del lado del receptor dejando un extremo libre de igual manera que el transmisor.
2. Encienda el Generador de Funciones y colóquelo a una frecuencia de y la ganancia del receptor al máximo.
3. Coloque los extremos libres de la fibra a una distancia de 6 mm. entre ellas. Como se lo muestra en la Fig. 8.1.

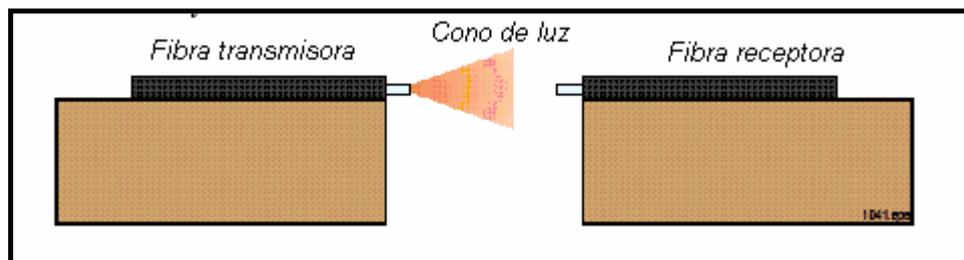


Figura 8.1. Vista lateral de las fibras receptora y transmisora situadas una al frente de la otra para ser usadas como un sensor óptico activo

4. Encienda el módulo de transmisión recepción.
5. Coloque una pieza de papel blanco entre los extremos libres de las fibras. Luego mueva el papel a 2 mm. de la fibra del receptor. ¿Qué sucede con el sonido del parlante cuando la hoja es situada entre el transmisor y el receptor?
6. Apague las luces del cuarto, luego mueva la hoja de papel entre los extremos de las fibras de nuevo. ¿Existe alguna diferencia entre tener las luces del cuarto encendidas o apagadas, afecta esto al censar la hoja en movimiento entre las dos fibras?
7. Ahora deslice una pieza de papel celofán o plástico entre los extremos libres de las fibras y escuche el cambio en el volumen del sonido en el parlante. ¿Se puede detectar la presencia del plástico así como se lo hizo con el papel blanco?

8. Ahora haga lo mismo con una pieza de papel color negro. Se puede detectar la presencia del papel negro, mediante el sonido expedido por el parlante?
9. Reacomode las fibras anguladas la una de la otra tal como lo muestra la Figura 8.2.

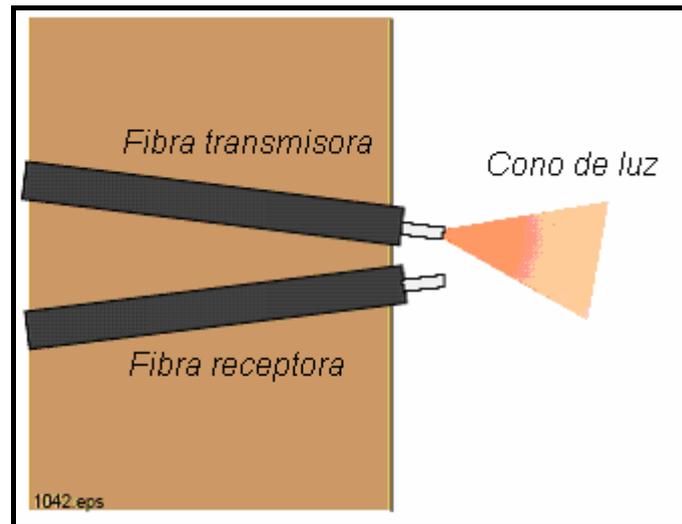
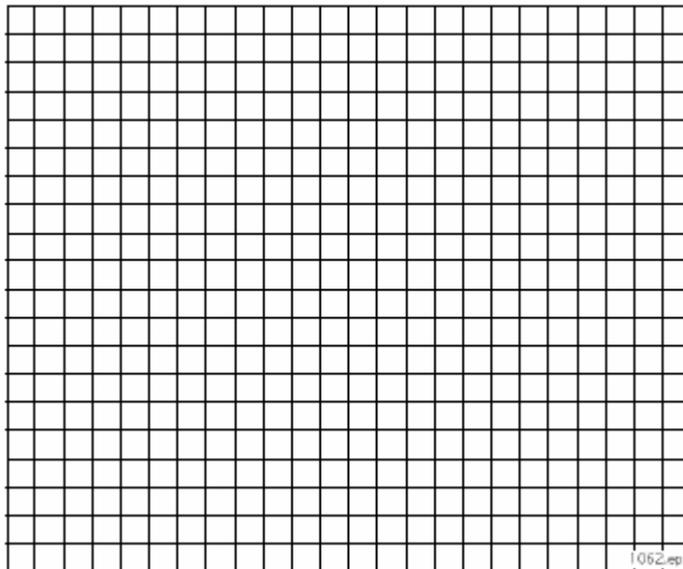


Figura 8.2. Fibra transmisora y receptora de un arreglo de sensores de reflexión.

10. Coloque una hoja de papel blanco en frente de los extremos de las fibras a una distancia de 2,5 cm. Mueva el papel hasta que pueda localizar la posición del papel en la que el sonido del parlante sea el máximo audible y mida dicha distancia.
11. Siga moviendo el papel hasta que tope los dos extremos de la fibra.
12. Grafique la intensidad del sonido versus la distancia del papel blanco desde los extremos de la fibra.



13. Ahora pase el papel celofán o plástico, así como el papel negro frente a las dos fibras para ver si detecta su presencia. Pruebe con varias distancias.
14. Cual es la diferencia hay entre esta configuración del sensor y la anterior? Son iguales? Son opuestas? El volumen aumenta o decrece cuando los objetos están presentes?

## Práctica # 9

### INMUNIDAD AL EMI EN LA FIBRA OPTICA.

#### Introducción:

La interferencia electromagnética EMI es radiación electromagnética que es emitida por circuitos eléctricos que conducen señales que cambian muy rápidamente, como producto de su operación normal y que causa señales indeseadas que pueden ser inducidas en otros circuitos.

El efecto de interferencia electromagnética puede ser inducido en una línea de transmisión como un cable coaxial por ejemplo, o una onda electromagnética.

En las transmisiones por fibra óptica, la EMI no es un problema ya que no hay forma de que las ondas electromagnéticas afecten a la fibra óptica. Este es un hecho por el cual la fibra óptica puede ser usada en plantas industriales o en aeronaves donde se desea tener lo menos posible de EMI. A través de la siguiente actividad se podrá comprobar la inmunidad de la fibra óptica ante la interferencia electromagnética.

#### Objetivos:

- Identificar algunas de las ventajas de la tecnología de fibra óptica sobre la de cobre.
- Ver u oír los efectos del EMI causada por un motor DC en el cable de cobre.
- Observar como el cable de fibra óptica es inmune a los efectos del EMI.
- Comparar el peso de la fibra óptica con el de un cable de cobre o un cable coaxial.

#### Materiales:

- 3 y 10 metros de fibra óptica de plástico.
- Modulo de transmisión analógica
- motor pequeño DC
- Micrófono electret.
- Altavoces

**Experimento A: Demostración del EMI.**

1. Coloque 3 metros de fibra óptica como medio entre el receptor y el transmisor, usando como herramienta el LED rojo.
2. Coloque el conector del micrófono en el receptáculo del motor. Inserte la terminación del cable del motor en el receptáculo de 3.5 mm ubicado en el transmisor.
3. Asegúrese de energizar el motor DC, el transmisor y el receptor correctamente.
4. Encienda los bloques de comunicación y mientras hablan en el micrófono rote el volumen del receptor hasta que el sonido proveniente del parlante se encuentre en un nivel moderado.
5. Hable en el micrófono. Usted oirá un sonido proveniente del parlante.
6. Cuando usted encienda el motor, deberá oír un ruido producido por la estática proveniente del parlante.
7. Compruebe que tan difícil es comprender los sonidos con el ruido estático producido por el motor DC.
8. Apague los módulos y desconecte el motor y la fibra óptica.

**Experimento B: Inmunidad de la fibra óptica al EMI.**

1. Ahora conecte el micrófono directamente al transmisor.
2. Conecte un extremo de los 10 metros de fibra óptica que se encuentra enrollada en el motor DC al LED rojo ubicado en el transmisor y el otro extremo al receptor.
3. Energice el motor DC, el transmisor y el receptor.
4. Encienda los bloques de comunicación y asegúrese de que el sistema funcione correctamente, verificando el volumen del parlante en el receptor.
5. Ahora encienda el motor DC. Se escucha alguna diferencia en la calidad del sonido cuando esta el motor encendido o el motor apagado en este experimento? Describa con sus propias palabras las conclusiones del EMI y sus efectos en la fibra óptica y el cable de cobre.

## Práctica # 10

### DISPOSITIVOS DE INTERCONEXION PARA LA FIBRA OPTICA. CONECTORES ST PARA FIBRA DE PLASTICO.

#### Introducción:

Los dispositivos electrónicos son usualmente interconectados, ya sea para formar un sistema mayor o para intercambiar información o datos. Un ejemplo de esto es el sistema local de telefonía conectado con cables de cobre a la red de conmutadores.

En las practicas anteriores se a mencionado fibra óptica, transmisores y receptores, pero no se ah descrito en detalles como estos elementos están conectados uno al otro.

En esta práctica se discutirá acerca de métodos de conexión y herramientas usadas con componentes de fibra óptica.

#### Objetivos:

- Ser capaz de definir interconectores de fibra.
- Identificar los 4 componentes básicos que poseen los conectores de fibra óptica.
- Discutir las ventajas y las desventajas de los diferentes conectores de fibra óptica que existen.
- Estudiar el procedimiento general de la instalación de conectores y el pulimento de sus terminaciones en la fibra óptica plástica.
- Instalar un conector ST en el extremo de una fibra óptica, incluyendo el poncheo y los pasos posteriores de pulimento.
- Medir las perdidas de inserción del cable de fibra óptica.

#### Materiales:

- 1 micro pelador de fibra óptica (1mm.)
- 1 ponchador de fibra óptica
- 1 juego de lijas
- 3 metros de fibra óptica plástica
- 2 conectores tipo ST para fibra óptica

## Procedimiento A

En esta demostración aprenderemos a instalar un conector ST® en un cable de fibra óptica plástica. Cada paso de este procedimiento debe ser tomado como si se estuviese ejecutando en una aplicación real. En la primera parte deberá completar de pulir las terminaciones de la fibra, el cual es un paso muy importante en el procedimiento general. Después de ensamblar los conectores a la fibra se deberá medir que tan bien trabaja.

1. El conector ST que utilizaremos consiste de de cuatro partes como se muestra en la figura. Cada paquete de ensamblaje contiene un caucho de tensión negro, una manga color naranja, un conector metálico plateado y un protector plástico. El conector es un ensamblaje con un tubo cilíndrico largo (el extremo), y un seguro situado en forma de un anillo en C.

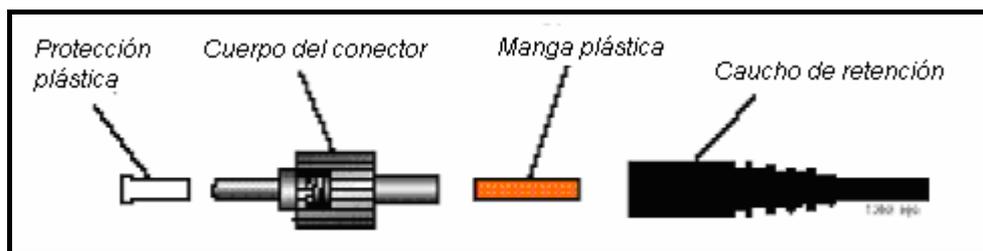


Figura 10.1. Componentes del conector ST.

2. Sostenga la peladora de cables en una mano y el cable de fibra óptica en la otra. No apriete el mango de la peladora de cables aun.
3. Inserte el cable de fibra en el agujero de la peladora (guía de fibra) hasta que el final de la fibra este alineado con la medida de los 22 mm.
4. Apriete el mango de la peladora de cables hasta que esté completamente cerrada y luego suavemente deje de hacer presión en el mango.
5. Mientras mantiene una presión suave pero constante en el pelador de cables, tire la fibra de la herramienta para despojar el cable de la cubierta (puede ser que un tirón fuerte pueda ser requerido).

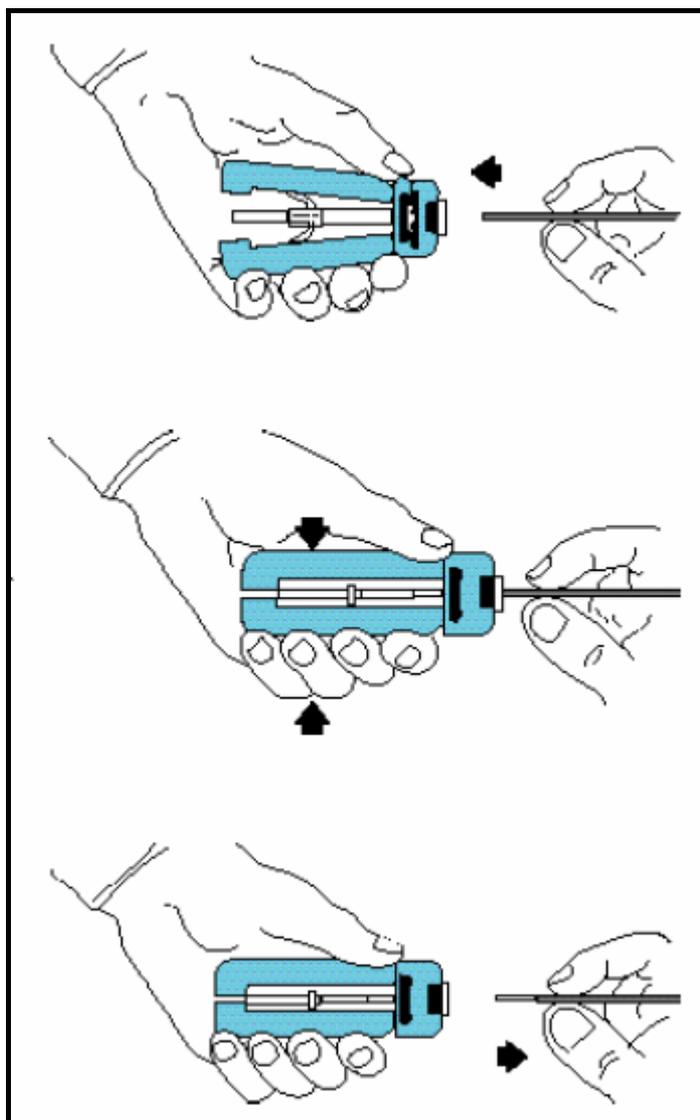


Figura 10.2. Orientación correcta entre la fibra y la peladora de cables.

6. Ahora usted debería tener un cable de fibra con el núcleo libre y descubierto, expuesto alrededor de 22 mm.
7. Deslice la pequeña terminación de tensión color negra en el extremo de fibra que acaba de pelar.
8. Deslice también la manga de color naranja en el cable de fibra. Presione la manga hasta que el final este lo mas cerca de la fibra expuesta.
9. Deslice el extremo largo del cuerpo del conector hacia la parte expuesta de la fibra justo encima de la manga naranja. Y presiónela hacia el cable de fibra tanto como pueda. Debe haber de 3 a 10 mm.

de manga naranja sobresaliendo del final del cuerpo del conector, y de 1 a 2 mm. de fibra desnuda sobresaliendo en el otro extremo del conector.

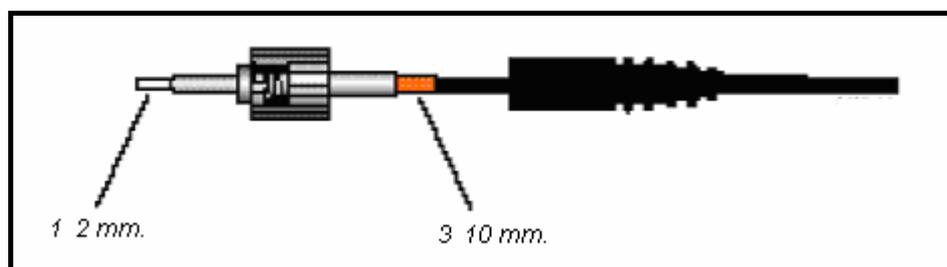


Figura 10.3. Conector ST propiamente localizado y punchado en un cable de fibra óptica.

10. Usted usara el hoyo hexagonal numero 0.128 pulgadas de las tenazas de la ponchadora para punchar el cuerpo del conector ST en el cable. Esta medida es la mas pequeña en la ponchadora, la cual tiene seis hoyos. Si la ponchadora no esta completamente abierta, apriete suavemente el mango de las tenazas hasta que este cerrada. Continúe presionando hasta que el mecanismo del cerrojo de las tenazas se libere, permitiendo que las tenazas se abran completamente.

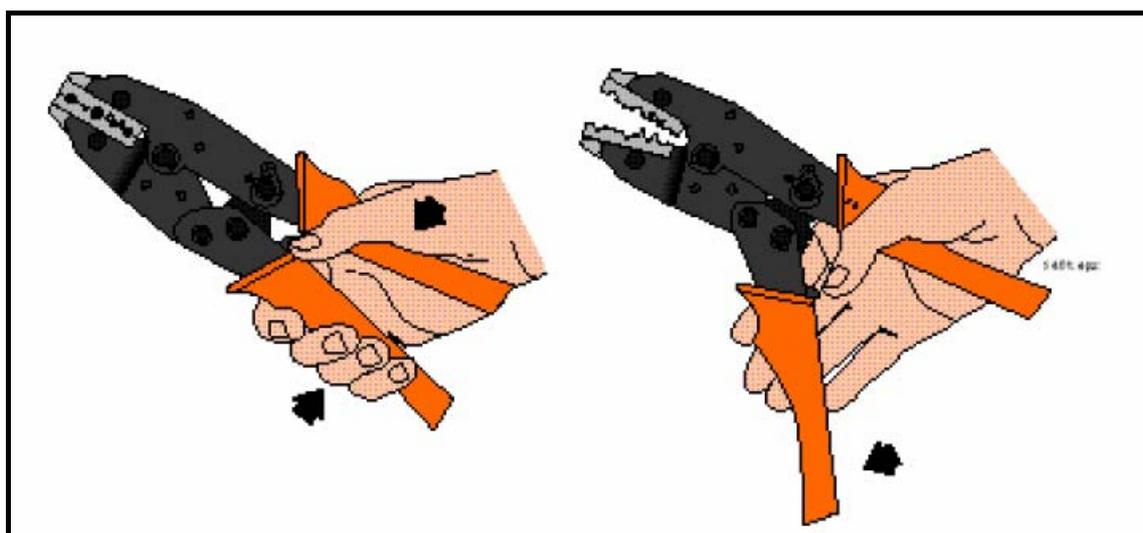


Figura 10.4. Agarre debido de la ponchadora.

11. Posicione el extremo del conector en el hoyo de 0.128 pulgadas como se muestra en la figura y presione suavemente el mango de la ponchadora hasta que las tenazas solo hagan contacto con el. No aplique ninguna clase de presión en el mango.



Figura 10.5. Posición correcta del conector ST en la ponchadora.

12. A esta altura del procedimiento, debe estar seguro que ambas tenazas estén sujetando firmemente el alrededor del seguro en forma de anillo del conector. Esto nos asegurara que el cuerpo del conector ST será ponchado. también, se debe estar seguro de que el cable de fibra óptica este situado firme en el conector.

13. Mientras este seguro que el cable de fibra y el conector no se moverán de posición, apriete suavemente el mango para cerrar las tenazas hasta que la herramienta ponche el cable.
14. Deslice el caucho protector hacia el conector.
15. Corte el exceso de fibra sobresaliente del conector. Alrededor de 2 mm.
16. Realice el procedimiento de pulimento, con el final del conector ST.

### Medición de pérdidas de inserción.

Los cables de fibra óptica generalmente son medidos en su atenuación cuando están completos. Es decir, después de su fabricación, y muchas veces deben ser medidos antes y después de su instalación. Ahora usted debe medir la atenuación o la pérdida de luz a través de la fibra que usted acaba de ensamblar.

1. En el medidor de potencia óptica, coloque el conmutador selector a 200  $\mu\text{W}$  y el selector de longitud de onda a 650 nm. Con el protector plástico colocado en la entrada óptica del medidor de potencia encienda el aparato. Ajuste el indicador hasta que este muestre "cero", siguiendo el "Procedimiento de encendido" de este manual.
2. Remueva los protectores del LED y del foto-detector en el medidor de potencia óptica y presione el botón de ACTIVACION DE LED.
3. Localizado el receptáculo del LED en la esquina inferior derecha del panel frontal. Remueva el protector del conector ST en un extremo del cable de 3 m. y conéctelo al receptáculo del LED.
4. Conecte el otro extremo en el receptáculo del DETECTOR del medidor de potencia.

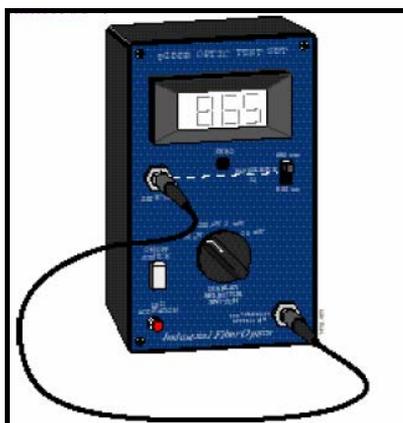


Figura 10.6. Medidor de potencia óptica.

## Práctica # 11

### DISPOSITIVOS DE INTERCONEXION PARA LA FIBRA OPTICA. EMPALMES.

#### Introducción:

Cuando una conexión entre fibra óptica permanente y otra fibra óptica es necesaria, la mejor manera de juntarlos es un empalme. La meta de un empalme es unir dos partes de fibra con precisión y a la vez trata de no interrumpir el flujo de energía óptica. Los empalmes tienen baja pérdida, típicamente entre 0.05 a 0.2 dB.

En un sistema con algunas interconexiones esta ventaja puede ser significativa. Los métodos más usados para emplames son por fusión y empalme mecánico.

La fibra óptica de plástico no puede ser fusionada.

#### Objetivos:

- Revisar las ventajas de los sistemas de fibra óptica.
- Estar conciente de las limitaciones que tiene la fibra óptica en ciertas aplicaciones.
- Completar un proceso de instalación de un empalme en un cable de fibra óptica plástica.
- Medir la atenuación en el cable de fibra óptica dada por el empalme.

#### Materiales:

- 1 Cortador de fibra óptica.
- 1 Peladora de cables.
- 1 Ponchadora de cables.
- 1 empalme de fibra óptica.
- 1 rollo de cable de fibra óptica plástica.
- 1 cable de 3 metros con conectores ST en ambos extremos.
- Power meter.

**Experimentos:**

En este ejercicio uniremos dos cables de fibra óptica usando un empalme mecánico. Después de realizar el empalme mediremos la atenuación del cable producido por el empalme.

**Experimento A:**

1. Encienda el medidor de potencia óptica, coloque el conmutador selector a 200  $\mu$ W y el selector de longitud de onda a 650 nm. Con el protector ubicado, ajuste el indicador hasta que este muestre "cero", siguiendo el "Procedimiento de encendido" de este manual.
2. Remueva los protectores del LED y del fotodetector en el medidor de potencia óptica y presione el botón de ACTIVACION DE LED.
3. Remueva las protecciones y presione el botón de ACTIVACION LED.
4. Coloque 3 metros de fibra óptica en el receptáculo del LED y el otro extremo a conector ST de cañón. Y coloque el extremo libre del cable de 2 metros de al receptáculo del detector.
5. Registre la lectura del Medidor de Potencia óptica en la tabla 11.1 y desconecte el cable y apague el OPM.

**Experimento B:**

1. Corte el cable de fibra óptica al cual le instalamos los conectores ST en la actividad anterior. Realice el corte a la altura de un metro del extremo final. (es decir, en el punto medio)
2. El empalme de fibra óptica que usted usara en esta actividad es un empalme tipo capilar. Es un cilindro de aluminio con dos hoyos precisos taladrados de forma coaxial. El hoyo más pequeño esta taladrado completamente, y es de la medida exacta del núcleo de la fibra óptica plástica de 1000  $\mu$ m. El hoyo más grande es del diámetro de la cubierta del cable de fibra óptica y esta parcialmente taladrado en cada extremo del empalme.
3. Sostenga la peladora de cables en una mano y el cable de fibra óptica en la otra. No apriete el mango de la peladora de cables aun.
4. Inserte el cable de fibra en el agujero de la peladora (guía de fibra) hasta que el final de la fibra este alineado con la medida de los 6.3 mm.
5. Apriete el mango de la peladora de cables hasta que esté completamente cerrada y luego suavemente deje de hacer presión en el mango.

6. Mientras mantiene una presión suave pero constante en el pelador de cables, tire la fibra de la herramienta para despojar el cable de la cubierta (puede ser que un tirón fuerte pueda ser requerido).

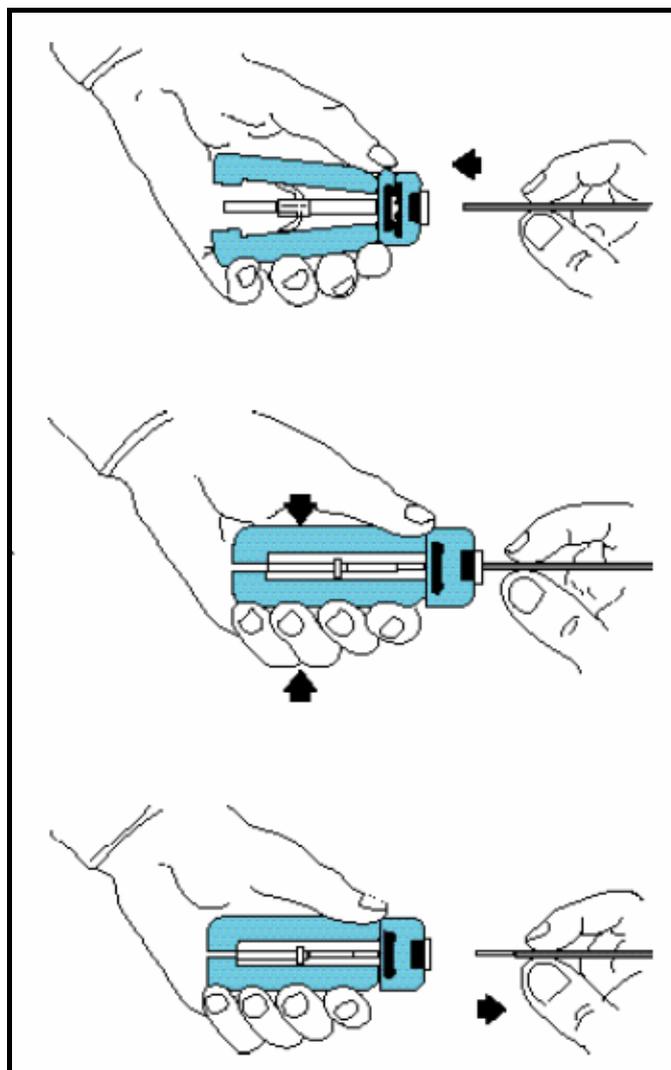


Figura 4.29 Orientación correcta entre la fibra y la peladora de cables.

7. Ahora usted debe tener un cable de fibra óptica en cuyo extremo debe estar su núcleo expuesto 6.3 mm. Repita estos mismos pasos (3 al 6) para el extremo del otro cable.
8. Deslice el extremo de la fibra en el empalme de aluminio hasta que se asiente dentro del empalme la cubierta del cable.

9. Usted usara el hoyo de 0.128 pulgadas en la ponchadora para asegurar el empalme al cable de fibra óptica. Este es el hoyo más pequeño en las tenazas. Si las tenazas no están completamente abiertas, apriete ligeramente hasta que el mango esta completamente cerrado. Continúe apretando hasta que el mecanismo de seguro de la ponchadora se libere. Asegúrese de que el extremo final del empalme este alineado correctamente con el hoyo de la ponchadora. El hoyo de la ponchadora debe cubrir únicamente la parte del empalme donde el núcleo este cubierto aun por la chaqueta protectora. Apriete despacio hasta que las tenazas hagan contacto con el empalme. No aplique aun ninguna clase de presión en los mangos.
10. Asegúrese de que la fibra este completamente insertada en el empalme y alineada con la ponchadora, tal como se muestra en la figura. Una vez hecho esto, apriete ligeramente hasta que las tenazas se cierren y el mecanismo se abra automáticamente. El poncheo esta completo ahora.

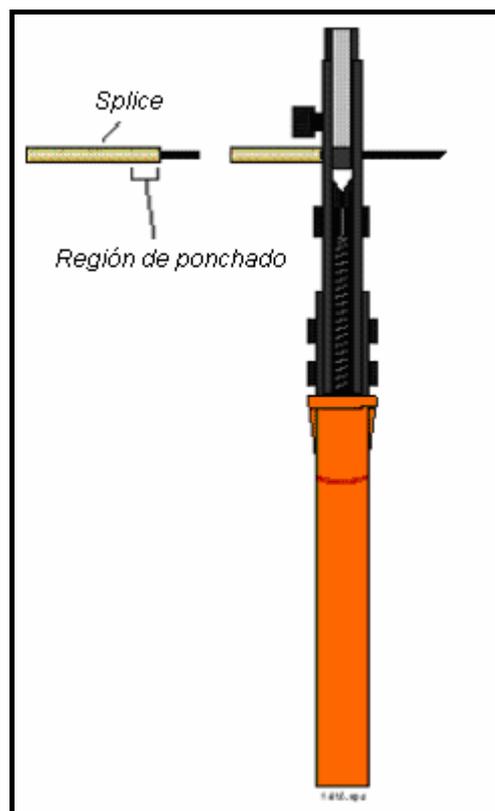


Figura 4.30 Alineamiento correcto del empalme capilar con la ponchadora de fibra para su correcta instalación.

11. Index matching, y repita los pasos 9 y 10.

**Experimento C:**

1. Encienda el OPM y encérralo de ser el caso. (el cable de 3 metros debe estar conectado al receptáculo del OPM)
2. Coloque uno de los extremos de la fibra en la que se hizo el empalme al conector ST de cañón. Y el otro extremo de la fibra al receptáculo del DETECTOR.
3. Registre la medición del OPM. En la tabla 4.27

CABLE	OPTICAL POWER
3 2+1 metro empalme	

Tabla 4.27 Mediciones hechas con el OPM

4. Desconecte la fibra del OPM y del conector ST en cañón. Y coloque todas las protecciones.
5. Calcule la perdida entre los dos fibras, antes y después del empalme.

$$10 \cdot \log \left[ \frac{P_{1+2empalme}}{P_{(3)}} \right]$$

### **PROCEDIMIENTO DE “ENCERADO” DEL OPM.**

Periódicamente será necesario la calibración del display LCD para que el mismo muestre cero (0) en ausencia de luz en su fotodetector. El procedimiento se detalla a continuación:

1. Coloque las protecciones en el receptáculo del fotodetector.
2. Coloque el switch selector en el rango de medida a utilizar (el encerado del equipo se deberá hacer cada vez que se establezca un rango de medidas diferente).
3. Encienda el equipo OPM y esperar al menos un minuto para la estabilización del sistema de medición.
4. Inserte un destornillador mediano NO metálico en el orificio marcado con la etiqueta ZERO en la parte frontal del panel y calibre el potenciómetro interno hasta que se aproxime a cero.

NOTA: Este potenciómetro únicamente gira 3/4 de revolución, no ajustar más de este parámetro establecido o podrá causar daños permanentes al equipo.

## BIBLIOGRAFIA

1. ALVARENGA MAXIMO, Física General, Editorial TEC-CIEN, México 1995.
2. MAHLKE GUNTHER y GOSSING PETER, Conductores de fibras ópticas – Conceptos básicos, Editorial Siemens Aktiengesellschaft, España 1987.
3. BOYD WALDO, Fiber Optics Communications – Experiments and Projects, Howard Sams Publishing, Indianapolis USA 1992.
4. PALAIS JOSEPH, Comunicaciones Fibra Optica, Editorial Prentice-Hall, USA 1998.
5. DERICKSON DENNIS, Fiber Optics Test & Measurement, Prentice-Hall Inc., USA 1997.
6. CHERIN, Introducción a las Fibras Opticas, Editorial McGraw-Hill, USA 2000.
7. JARDON HILDEBERTO Y LINARES ROBERTO, Sistemas de Comunicaciones por Fibras Opticas, Editorial Alfaomega, México 2005.
8. STEWARD PERSONICK, Optical Fiber Transmission Systems, Plenum, USA 1981.
9. ALLARD, Fiber Optics for Engineers and Scientist, Editorial McGraw-Hill, USA N.Y. 1993.
10. WILEY JOHN&Sons, Plastic Optical Fibers, Club Des Fibres Optiques, USA N.Y. 1991.

11. Plastic Optic Fiber Trade Organization,  
<http://www.pofto.com/index.html>
12. *Lightwave Magazine*, PenWell/ATD, Ten Tara Blvd., Fifth Floor,  
Nashu, NH 03062-2801
13. *Optical Engineering* , SPIE, P. O. Box 10, Bellingham, WA 98227-0010
14. MARTIN PEREDA, J, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*,  
PEARSON EDUCACIÓN,S.S., Madrid, 2004.