

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**  
**Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**LA TECNOLOGIA DE LOS SENSORES**  
**DE FIBRA OPTICA**

**POR**  
**ING. CLAUDIO RANDHU GONZALEZ ROJAS**

**TESIS**  
**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**DE LA INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN**  
**TELECOMUNICACIONES**

**CD. UNIVERSITARIA**

**JUNIO DEL 2001**

2001

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2001  
-66695

LA TECNOLOGIA DE LOS SENSORES  
DE FIBRA OPTICA

C.R.G.R.



1020147445



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

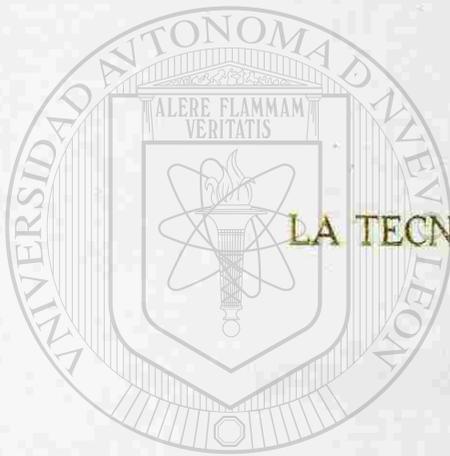


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



LA TECNOLOGIA DE LOS SENSORES  
DE FIBRA OPTICA

POR

ING. CLAUDIO RANDHU GONZALEZ ROJAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

DE LA INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN

TELECOMUNICACIONES

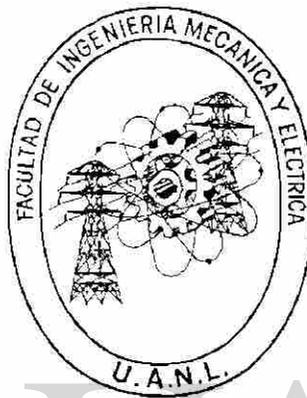
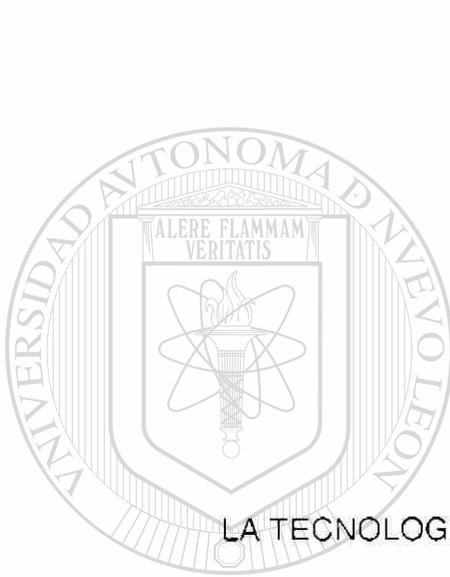
CD. UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2001

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



LA TECNOLOGIA DE LOS SENSORES DE FIBRA OPTICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. CLAUDIO RANDHU GONZALEZ ROJAS

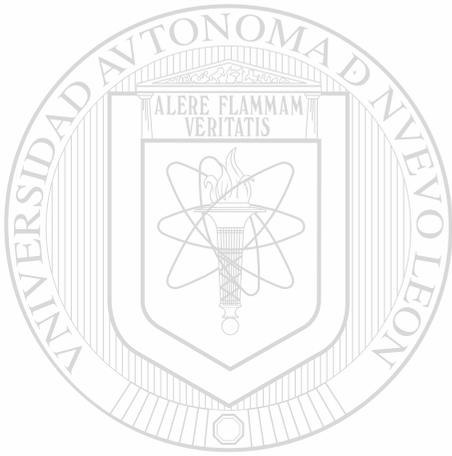
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA  
CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DEL 2001

311775

TH  
ZS8E3  
aMa  
FIME  
2001  
.G6693



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

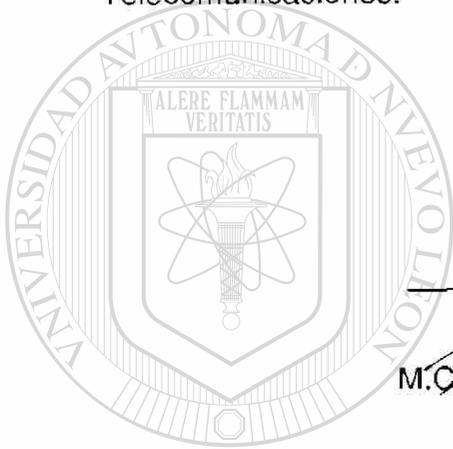


**FONDO  
TESIS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “ La tecnología de los sensores de fibra óptica” realizada por el alumno Ing. Claudio Randhú González Rojas, matrícula 0783234 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de Ingeniería con especialidad en Telecomunicaciones.

El comité de Tesis



  
Asesor

M.C Leopoldo René Villarreal Jiménez

  
Coasesor

M.C Fernando Estrada Salazar

  
Coasesor

M.C Humberto Figueroa Martínez

  
Vo.Bo.

M.C Roberto Villarreal Garza

División de Estudios de Post-grado

San Nicolas de los Garza, N.L. a Junio del 2001

# PROLOGO

El diseñar un enlace con fibra óptica ya sea para sensores o para comunicaciones, es un proceso en el que intervienen muchos factores. Se debe tener una clara idea de las sensibilidades requeridas, de la precisión de las medidas, de las condiciones del medio ambiente, la velocidad de respuesta, etc. Aunque los elementos del sistema (transmisor, dispositivo sensor, fibra óptica y receptor) se pueden diseñar individualmente para su mejor funcionamiento, al final son interdependientes. Por ejemplo la atenuación de una fibra no decide si se usa del tipo monomodo o multimodo, influye mucho más el tipo de emisor usado.

Si se utiliza un LED deberá usarse fibra multimodo, si el emisor es un diodo láser puede utilizarse ya sea multimodo o monomodo. Estas interrelaciones entre los distintos parámetros frecuentemente dificultan las decisiones. La selección adecuada de los componentes depende en gran medida de la aplicación en donde se trabaje.

---

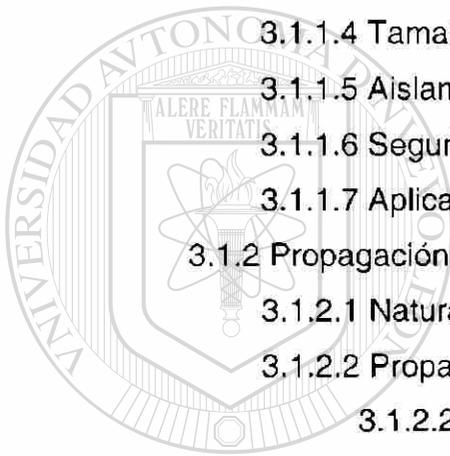
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# INDICE

Capítulo	Página
SINTESIS	1
1. INTRODUCCION	4
1.1 Problema a resolver	4
1.2 Objetivo de la tesis	5
1.3 Hipótesis	5
1.4 Límites del estudio	5
1.5 Justificación del trabajo de tesis	5
1.6 Metodología	6
1.7 Revisión bibliográfica	7
<hr/>	
2. CONSIDERACIONES Y METODOLOGIA DE DISEÑO	8
2.1 Introducción	8
2.1.1 Consideraciones de diseño	9
2.1.1.1 Componentes del sistema	9
2.1.2 Criterios básicos	11
2.1.2.1 La velocidad de transmisión del sistema (B)	11
2.1.2.2 Distancia de transmisión	11
2.1.2.3 El producto BL	11
2.1.3 Consideración sobre los transmisores	12
2.1.4 Consideraciones sobre fibras ópticas	15
2.1.5 Consideraciones de receptores	17
2.1.6 Consideraciones de modulación	21
2.2 Metodología de diseño de sistemas digitales	23

2.2.1 Procedimiento de diseño	24
2.2.2 Ejemplo de diseño	27
<b>3. PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS BASICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS</b>	<b>29</b>
3.1 Propiedades de las fibras ópticas	29
3.1.1 Ventajas y desventajas de la fibra óptica	32
3.1.1.1 Amplio ancho de banda	32
3.1.1.2 Bajas pérdidas	33
3.1.1.3 Inmunidad a la interferencia electromagnética	33
3.1.1.4 Tamaño y flexibilidad	33
3.1.1.5 Aislamiento eléctrico	34
3.1.1.6 Seguridad	34
3.1.1.7 Aplicaciones	34
3.1.2 Propagación de las ondas de luz	37
3.1.2.1 Naturaleza ondulatoria de la luz	37
3.1.2.2 Propagación de la luz	37
3.1.2.2.1 Leyes de la reflexión	39
3.1.2.2.2 Leyes de la refracción	39
3.1.2.3 Índice de refracción (N)	43
3.1.2.4 Apertura numérica	44
3.1.3 Modos de propagación	45
3.1.3.1 Designación e identificación de los modos	46
3.2 Fabricación de una fibra óptica	46
3.2.1 Construcción	46
3.2.2 Procesos de fabricación	47
3.2.2.1 Deposición de vapores	47
3.2.2.2 Método de fusión directa o de doble crisol	47
3.3 Fuentes de luz de fibra óptica de estado sólido	56
3.3.1 Dispositivos para la emisión y detección de luz	56
3.3.1.1 Fotoemisores	56



UNANIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



3.3.1.2 Diodo emisor de superficie (SLED)	56
3.3.1.3 Diodo emisor lateral (ELED)	56
3.3.1.4 Diodo laser de inyección	57
3.3.2 Usos del laser en la fibra óptica	58
3.3.2.1 Transmisor	62
3.3.2.2 Acoplamiento mecánico en transmisores	63
3.3.2.3 Pigtail	64
3.3.2.4 Acoplador de Dispositivo Activo (ADM)	64
3.4 Fotodetectores	65
3.4.1 Fotodiodo PIN	66
3.4.2 Fotodiodo APD	67
3.4.3 Receptor	68
3.4.4 Detectores	69
3.4.5 Acoplamiento mecánico en detectores	69
<b>4. COMPONENTES DE INTERCONEXION DE FIBRA OPTICA</b>	<b>72</b>
4.1 Empalmes y conectores	72
4.1.1 Pérdidas extrínsecas e intrínsecas	73
4.1.1.1 Pérdidas extrínsecas	73
4.1.1.2 Pérdidas intrínsecas	75
4.2 Empalmes	76
4.2.1 Empalmes mecánicos (elastoméricos)	76
4.2.2 Empalme por fusión	77
4.3 Conectores	80
4.3.1 Procesos de conectorización o conexión	81
4.4 Tipos de fibras y cables ópticos	86
4.4.1 Tipos de fibras ópticas	86
4.4.2 Fibras de índice escalonado	87
4.4.2.1 Dispersión modal	87
4.4.2.2 Dispersión cromática	88
4.4.3 Fibras de índice gradual	88

4.4.4 Capacidad de transmisión	89
4.4.4.1 Dimensiones	90
<b>5. SENSORES CON FIBRA OPTICA</b>	<b>91</b>
5.1 Introducción	91
5.2 Fenómenos físicos que intervienen en sensores	93
5.2.1 Birrefringencia	93
5.2.2 Estado de polarización	93
5.2.2.1 Polarización lineal	94
5.2.2.2 Polarización Circular	94
5.2.2.3 Polarización Elíptica	95
5.2.3 Efecto electro-óptico	96
5.2.4 Efecto Fotoelástico	97
5.2.5 Efecto magneto-óptico	98
5.3 Clasificación de los sensores	99
5.3.1 Modulación por intensidad: Tipo I	100
5.4 Modulación por fase tipo A: sensores interferométricos	101
5.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder	103
5.4.1.1 Sensores acústicos	104
5.4.1.2 Termómetros	105
5.4.2 Interferómetro de Michelson	106
5.4.3 Interferómetro de Sagnac	107
5.4.4 Interferómetro resonador	110
5.5 Modulación por frecuencia: Tipo F	112
5.6 Modulación por distribución de longitud de onda: Tipo W	112
5.7 Modulación por polarización : Tipo P	113
5.8 Sensores con fibras ópticas por aplicación	114
5.8.1 Sensores de temperatura	115
5.8.1.1 Tipo I-1 Sensor por índice de refracción	115
5.8.1.2 Tipo A-1 sensor interferométrico	116
5.8.1.3 Tipo I-2 Radiación de cuerpo negro	116

5.8.2 Sensor de presión	116
5.8.2.1 Tipo I-1 Microcurvaturas	116
5.8.2.2 Tipo A-1 Sensores interferométricos	117
5.8.3 Sensores magnéticos	117
5.8.3.1 Tipo P-1 por rotación de Faraday	117
5.8.3.2 Tipo P-2 sensores de corriente y voltaje	118

## 6. EJEMPLO DE UNA EXPERIMENTACION CON SENSORES

### INTERFEROMETRICOS 119

6.1 Introducción	119
------------------	-----

6.2 Antecedentes	120
------------------	-----

6.2.1 Tipos de acopladores	120
----------------------------	-----

6.2.1.1 Acoplador árbol	121
-------------------------	-----

6.2.1.2 Acoplador estrella	122
----------------------------	-----

6.2.1.3 Acoplador tap	122
-----------------------	-----

6.2.2 Matriz de pérdidas del acoplador utilizado	122
--	-----

6.3 Descripción del arreglo	123
-----------------------------	-----

6.3.1 Análisis de la interferencia en el acoplador	123
--	-----

6.3.2 Arreglo experimental	128
----------------------------	-----

6.4 Resultados y comentarios	129
------------------------------	-----

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 132

7.1 Conclusiones	132
------------------	-----

7.2 Recomendaciones	133
---------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	134
--------------	-----

LISTADO DE TABLAS	135
-------------------	-----

LISTADO DE FIGURAS	136
--------------------	-----

GLOSARIO	139
----------	-----

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO	142
------------------------	-----

# SINTESIS

Este trabajo de tesis presenta toda la información necesaria para entender el funcionamiento de los sensores de fibra óptica, así como conocer las propiedades básicas de las fibras ópticas y diseños de sistemas de comunicación con estas mismas. Todo esto con el objetivo de mostrar al lector los criterios y problemas que intervienen en el diseño de un sistema de sensado con fibra óptica. La presente necesidad de incrementar la capacidad de los sistemas de comunicaciones, así como reducir el tiempo y costo de los mensajes; ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías en todo el mundo como lo son las fibras ópticas y en particular los sensores de fibra óptica.

Comparados contra los sistemas de cobre, los sistemas de transmisión de fibra óptica operan por cada mensaje con menor energía, menor atenuación en la señal por unidad de distancia, amplio ancho de banda al incrementar la capacidad del canal, menor interferencia electromagnética, mayor inmunidad al ruido externo, mayor distancia en la transmisión y sin fin de ventajas que se podrían nombrar.

Todas estas ventajas han servido a los desarrollos en las fuentes de luz, fibras ópticas, conectores y fotodetectores. Cientos de millones de dólares han sido invertidos anualmente para mejorar los componentes de los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas.

Invirtiendo en la disponibilidad de componentes ópticos, ha sido significativo progreso durante los últimos años para nuevas clases de sensores que emplean fibras ópticas.

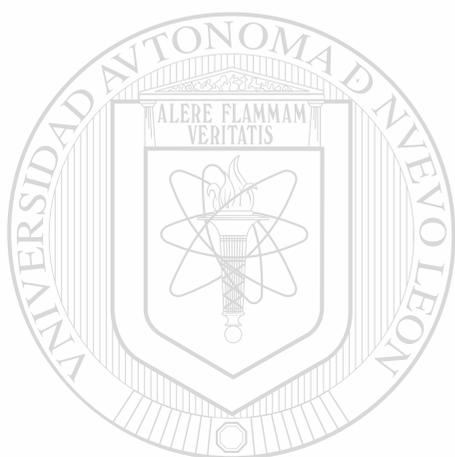
Estos sensores son capaces de detectar campos acústicos, aceleraciones lineales y circulares, campos eléctricos y magnéticos y muchos otros parámetros eléctricos. En efecto, los sensores regulan algunas características en las ondas de luz dentro de una fibra óptica, como la intensidad, o la fase de las ondas de luz. Usualmente la modulación de fase puede ser convertida en una modulación de intensidad antes de su detección. Esto puede traducirse en diversas formas de interferómetros ópticos. Las señales ópticas pueden ser de forma analógica o discreta y el sistema puede operar con la conversión de la señal óptica-eléctrica o eléctrica-óptica. Los sensores de fibra óptica descritos en este trabajo de tesis pueden ser usados en sistemas de transmisión tanto eléctricos como electromagnéticos.

Este trabajo de Tesis, está diseñado como un documento individual que sirve para muchas propuestas. Esto provee un respaldo para entender los conceptos del campo de las fibras ópticas, particularmente las aplicaciones de los sensores de fibras ópticas. Aquí, se describen las propiedades de las fibras ópticas, sus procesos de fabricación, así como las propiedades de las fuentes de luz y detectores asociados con los sensores de fibras ópticas. Se hace gran énfasis en las consideraciones de diseño para una mejor selección de componentes como conectores, divisores, acopladores y cables que se podrían utilizar en un sistema con sensores.

Diferentes esquemas pueden ser utilizados para el control de las ondas de luz en el orden de los parámetros físicos de sensado. Muchos de estos esquemas de control son discutidos en este trabajo de Tesis, incluyendo los términos de interferometría, polarización y modulación, así como los diferentes tipos de sensores y sus términos de diseño y operación.

Por último se presenta un arreglo experimental con sensores interferométricos con el propósito de servir como referencia a aquellos interesados en construir un arreglo de este tipo. En este arreglo se presenta una matriz de pérdidas del acoplador utilizado en el laboratorio y se muestra el procedimiento para calcular la intensidad esperada para el interferómetro resonador.

Al final se señalan algunos problemas que se pueden presentar al construir un interferómetro resonante.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

### 1.1 Problema a Resolver

En la actualidad la necesidad de incrementar la capacidad de los sistemas de comunicación, reducir el tiempo por cada mensaje, y sobre todo la seguridad y confiabilidad de la información, ha propiciado el desarrollo de cientos de operaciones utilizando los sistemas de comunicaciones con ondas de luz alrededor del mundo.

La atenuación o pérdida de potencia en la señal, ocasionada por las distancias entre los equipos, los diversos contaminantes que afectan a los sistemas alámbricos de cobre y sobre todo la necesidad de obtener un Ancho de Banda cada vez mayor, han dado paso libre al desarrollo y utilización de la tecnología de transmisión de voz, datos y video a través de ondas de luz , usando fibras ópticas como medio de propagación y los sensores de fibra óptica como medio de recepción de la calidad de la información.

## 1.2 Objetivo de la tesis

El presente trabajo de tesis se diseña para entender particularmente la composición y el funcionamiento de los sensores de fibra óptica, así como para obtener un sólido conocimiento del desarrollo en el campo de los sistemas de comunicaciones que emplean la fibra óptica como medio de propagación.

## 1.3 Hipótesis

- Al conocer el funcionamiento y utilizar los sensores de fibra óptica, la calidad del intercambio de información, y la precisión de los sistemas de comunicación y control, mejorará con respecto a las tecnologías de cable de cobre que se utilizan actualmente.
- El uso de esta tecnología podrá reducir considerablemente los tiempos de comprobación de errores en el intercambio de información.

## 1.4 Límites del estudio

Estoy consciente de que existen diversos sistemas de comunicaciones con fibra óptica, pero muy pocos utilizan la tecnología de los sensores de fibra óptica. En este trabajo me dedicaré a enfocarme particularmente a los diferentes tipos y aplicaciones de los sensores de fibra óptica, así como a sus componentes de interconexión para el uso de la fibra óptica como medio de propagación.

## 1.5 Justificación del trabajo de tesis

Existen nuevas tendencias tecnológicas en la vida moderna que han hecho nuestra forma de vivir más fácil y más cómoda. El descubrimiento de grandes avances tecnológicos como el teléfono, el transistor, los circuitos

integrados, los cables de cobre, las microondas y la fibra óptica, nos han servido para desarrollar logros que antes eran solo un sueño.

En nuestros días, con el descubrimiento de la fibra óptica, se ha logrado acelerar en grandes cantidades los procesos de intercambio de información. Las tendencias de nuevas tecnologías van enfocadas al uso de la fibra óptica como medio de propagación debido a sus grandes ventajas sobre cualquier otro medio de propagación; por esto, las aplicaciones de la fibra óptica llevan consigo el desarrollo de nuevos equipos que interactúen en la calidad, seguridad y garantía de la información como lo son los sensores de fibra óptica, que debido a su eficiencia participan en una nueva gama de equipos que esta empezando a sobresalir en el ramo de la transferencia de información a través de ondas de luz y el uso de la fibra óptica como medio de propagación.

### 1.6 Metodología

- Recopilaré información a través de libros de texto, revistas técnicas, apuntes, material de cursos, conferencias, internet, etc.
- Analizaré la información recopilada para adaptarla al objetivo planteado y construir la estructura de la tesis.
- Mencionaré las ventajas de utilizar la fibra óptica en lugar del cable de cobre haciendo una comparación de los sistemas actuales de información.
- Haré propuestas sobre el uso correcto de los sensores de fibra óptica y explicaré el futuro y las tendencias de esta tecnología.

## 1.7 Revisión Bibliográfica

- Frederick C. Allayd con su libro Fiber Optic Handbook me ayudo a desarrollar los temas referentes a las propiedades básicas de las fibras ópticas, ya que su contenido esta basado en aplicaciones de campo.
- Fiber Optic Market Place ofrece una extensa información actualizada sobre los diferentes tipos de sensores que se fabrican para aplicaciones de sistemas de comunicación.
- El trabajo del Ing. Julio César Gutierrez Vega me sirvió de gran importancia para la demostración de los casos prácticos que se presentan en este trabajo; su trabajo ha desarrollado diversos modelos que me sirvieron de apoyo para la demostración de los diferentes sensores que presento en esta tesis.
- Gran parte del capítulo 2 de la tesis del ing. Leopoldo rene Villarreal esta incluida en este trabajo ya que presenta una buena explicación acerca de las propiedades de propagación de la luz, así como una gran variedad de transmisores, detectores, fotodiodos, procesos de fabricación de fibras y los diferentes empalmes que existen.
- Optical Cable Corporation me ofrece dentro de su website, los esquemas de los diferentes armados y empaquetados de fibra óptica para aplicaciones tanto en interiores como en exteriores como lo son las fibra con buffer (tight-buffer) y sin buffer (loose-tube).

# CAPITULO 2

## CONSIDERACIONES Y METODOLOGÍA DE DISEÑO

### 2.1 Introducción

Los elementos más importantes en un sistema de sensado por fibra óptica son el transmisor, el dispositivo sensor, el medio de transmisión y el receptor. La selección adecuada de los componentes depende en gran medida de la aplicación en donde se trabaje.

El objetivo de este capítulo es señalar las consideraciones que se deben tomar en cuenta para diseñar un sistema sensor con fibras ópticas. Como las aplicaciones son tan variadas y la selección de los componentes puede resultar difícil, es importante tener una buena visualización de las opciones que se tienen y de las ventajas y desventajas que cada elección presenta.

El presente capítulo consta de dos secciones: en la primera se analizan las principales consideraciones que se deben tomar en cuenta cuando se diseña el sistema. En esta sección sólo se hace énfasis en el emisor, en la fibra y el receptor, los cuales se especificarán cada uno de ellos en los capítulos siguientes.

En la segunda parte del capítulo se presenta una metodología ordenada de diseño de un sistema digital de fibra óptica.

Aquí quiero señalar que el método se puede aplicar tanto a sistemas sensores como a sistemas de comunicación. No se pretende ser dogmático sino solo mostrar un camino ordenado de razonamiento, además se incluyen algunos ejemplos de la metodología que se expone.

### 2.1.1 Consideraciones de diseño

Los criterios de diseño que se exponen a continuación se dan para cada elemento particular. Se dan criterios para los emisores, receptores, fibras ópticas y modulación.

#### 2.1.1.1 Componentes del sistema

Los sistemas ópticos pueden variar ampliamente de una aplicación a otra, sin embargo, la estructura general no cambia:

1. El transmisor modula al emisor óptico
2. La fibra es el medio de transmisión de la luz, puede ser el elemento sensor o sólo transmisor de información. Además en la fibra misma pueden existir:
  - a) Empalmes (mecánicos o de fusión)
  - b) Conectores
  - c) Acopladores
3. El detector óptico recibe la señal óptica que trae la información sensada y el receptor la reconstruye eléctricamente.
4. La señal se procesa y se analiza.

La señal que se desea transmitir se modula en el transmisor eléctrico, que a su vez modula por intensidad al diodo emisor.

La señal modulada se introduce a una fibra que está dentro de un cable que puede contener una o varias fibras. El cable sirve de protección y puede tener conectores y empalmes, dependiendo si el sistema enlaza puntos separados a una distancia mayor que el cable más grande.

Si la luz se necesita dividir para llegar a varios puntos de prueba es necesario usar un acoplador óptico.

Al final del proceso la señal óptica modulada se convierte a señal eléctrica por medio de un fotodetector y se demodula para obtener la señal con la información.

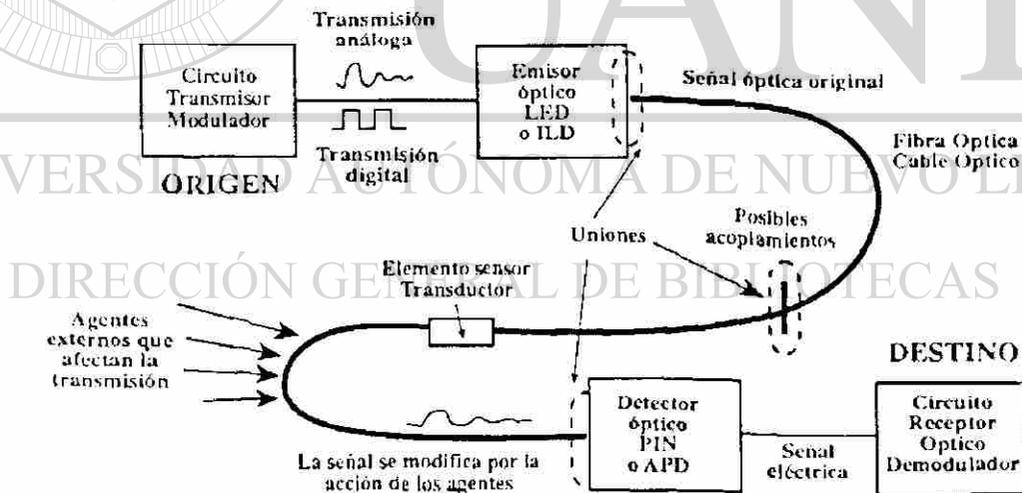


Figura 2.1 Esquema de un sistema óptico punto a punto con algunos elementos que intervienen en sistemas sensores con fibra óptica.

### 2.1.2 Criterios básicos

Existen muchos parámetros que especifican a un sistema de fibra óptica; pero existen dos características que son dominantes para establecer las condiciones del enlace ya sea para sensores o para comunicaciones.

#### 2.1.2.1 La velocidad de transmisión del sistema (B)

Se expresa en Hz o bits/seg dependiendo si la transmisión es análoga o digital respectivamente.

#### 2.1.2.2 Distancia de transmisión (L)

Es La distancia que mide la fibra. La Distancia de transmisión se refiere a la distancia máxima de la conexión. En caso de sensores se habla de distancias desde centímetros (p.ej. un interferómetro de Mach-Zehnder para medir vibración) hasta kilómetros (p.ej. sensores de altas corrientes en líneas de transmisión).

---

La velocidad de transmisión se relaciona con la cantidad de información que queremos manejar en un cierto tiempo. En algunas aplicaciones (p.ej. un giróscopo óptico) sólo se maneja una variable y B es baja, pero en otras (p. ej. medición de humedad, temperatura y presión en un horno industrial) se necesita mayor velocidad para monitorear las variables en tiempo real.

#### 2.1.2.3 El producto BL

Es el primer criterio a tomarse en cuenta. El diseño debe estar pensado para que el sistema tenga capacidad de un BL alto. Los emisores y receptores deben ser lo suficientemente rápidos para responder a los requerimientos de información. De nada sirve tener un dispositivo sensor muy veloz si el receptor no lo puede captar con la suficiente rapidez.

Otros criterios básicos importantes son:

1. La modulación digital o análoga
2. La fidelidad del sistema:
  - a) BER= Tasa de error de bit (Bit Error Rate ) para sistemas digitales
  - b) Razón de Señal a Ruido (SNR) para sistemas análogos
3. Costo del sistema:
  - a) Costo del emisor, del receptor y de la fibra
  - b) Instalación
  - c) Mantenimiento
4. La permanencia del sistema a través del tiempo.
5. La capacidad de mejoramiento del sistema (Incrementar el producto BL con mínimo costo.)

---

### 2.1.3 Consideración sobre los transmisores

Un transmisor óptico consiste de una fuente que podría ser un LED o un diodo láser, un mecanismo de acoplamiento de la luz emitida a la fibra óptica, un circuito de modulación, y en caso de un láser, un circuito de control. Además para algunas aplicaciones se necesita controlar la salida espectral.

Los transmisores presentan varias opciones, materiales y características que se presentan en la tabla 2.1, donde se señalan los parámetros más importantes.

Tabla 2.1 Características de los transmisores

<b>Opciones</b>	<p>Led de emisión superficial (SLED)</p> <p>LED de emisión lateral (ELED)</p> <p>Diodo láser (ILD)</p>
<b>Materiales</b>	<p>GaAIAs</p> <p>InGaAsP</p>
<b>Parámetros</b>	<p>Longitud de onda máxima (850, 1300, 1500 nm)</p> <p>Ancho de banda espectral</p> <p>Potencia de salida</p> <p>Acoplamiento de luz en la fibra</p> <p>Direccionabilidad</p> <p>Velocidad de respuesta (tiempo de subida y de bajada)</p> <p>Estabilidad (control de retroalimentación)</p> <p>Vida útil</p> <p>Costo</p> <p>Disponibilidad en el mercado</p> <p>Capacidad de mejora</p>
<b>Circuito transmisor</b>	<p>Propiedades térmicas</p> <p>Características eléctricas del circuito excitador</p> <p>Ciclo de trabajo</p> <p>Potencia consumida</p> <p>Técnica de modulación (digital o analógica)</p> <p>Codificación</p> <p>Interfase eléctrica (RS, TTL, ECL)</p> <p>Propiedades mecánicas</p>

En la Tabla 2.2 se muestra una comparación entre los LEDs y los diodos láser en cuanto a las características que afectan directamente al sistema.

Tabla 2.2 Comparación de las características de varios emisores

Parámetro	LED	Diode Láser
Corriente de umbral, mA	No aplicable	5 – 250
Corriente nominal	50 – 300	10 – 300
Caída de voltaje, V	1.5 – 2.5	1.5 – 2.0
Potencia de salida, mW	1 – 10	1 – 100
Potencia de entrada de la fibra, mW	0.0005 – 0.5	0.5 - .5
Ancho espectral, nm	35-50 (a 800 nm) 70 – 100 (a 1300 nm)	2 – 3 (a 800 nm) 3 – 5 (a 1300 nm)
Radiancia, W / (cm <sup>2</sup> )	1 – 10 (SLED) 10 – 100 (ELED)	> 100000
Tiempo de subida, ns	5 – 50 (SLED)	< 1
Frecuencia de respuesta, -3db, Mhz	< 500	> 500

Como se ve en la tabla 2.2 los diodos láser son superiores a los LEDs en:

- Potencia de salida
- Potencia de luz que entra a la fibra
- Ancho espectral reducido
- Alta radiancia
- Velocidad de respuesta

Pero los LEDs son superiores en:

- Manejabilidad
- Bajo costo
- Estabilidad
- Funcionamiento constante en el tiempo

### 2.1.4 Consideraciones sobre fibras ópticas

La fibra óptica consiste de un núcleo y un revestimiento. El núcleo es la sección central de la fibra a través de la cual viaja el haz de luz. El revestimiento es la capa que rodea al núcleo y cuya función es la de atrapar la luz dentro de la fibra. El material del que está compuesto la fibra puede ser vidrio o plástico. El vidrio es mejor material, sin embargo las fibras de plástico son más baratas

La fibra óptica presenta una gran capacidad de transmisión de información, ya que la señal se atenúa mucho menos que en cables de cobre. Además no presenta el problema del ruido eléctrico o cortos circuitos, característica muy útil en ambientes de alto riesgo ó explosividad lo cual la hace extremadamente útil en sensores.

Las características y tipos de fibras se listan en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Características generales de las fibras ópticas

Opciones	Fibra Multimodo	Índice escalonado, Índice graduado
	Fibra Monomodo	Sin dispersión corrida Con dispersión corrida Con dispersión plana
Materiales	Vidrio	Sílica, Plástico, Polímeros
Parámetros	Diseños del cable	Apretado, Holgado Armado o no armado Número de fibras en el cable
		Atenuación Dispersión Pérdidas extrínsecas (empalmes, curvaturas, etc) Variación con la temperatura Potencia de entrada Costo Capacidad de operar a condiciones más veloces

Las fibras para sensores generalmente presentan atenuaciones altas debido a que están dopadas y además no se manejan distancias grandes. Los cables frecuentemente tienen revestimientos especiales que son más sensibles a los agentes externos. Checar la tabla 2.4.

Las fibras que se utilizan en la actualidad para comunicaciones presentan atenuaciones del orden de 0.2 dB/Km. Esto constituye un gran avance si las comparamos con las primeras fibras con atenuaciones de 20 dB/Km.

Uno de los objetivos al diseñar un sistema sensor es incrementar la relación BL y tratar de bajar los costos. Las fibras monomodo presentan algunas ventajas sobre las fibras multimodo como por ejemplo:

- La fibra monomodo tiene mayor capacidad para manejo de altas frecuencias, ya que prácticamente no presenta dispersión modal.
- La fibra monomodo tiene menores pérdidas y es más barata que la multimodo, debido a que se producen millones de kilómetros al año.
- Una vez instalada, la fibra monomodo es muy duradera; si se desea modificar el sistema, se cambia el receptor y transmisor. Esto es, la fibra monomodo es más compatible con sistemas diferentes. Esto no sucedería con una fibra multimodo, ya que ésta influye bastante en el comportamiento del sistema.
- La relación BL se puede hacer mayor en una monomodo debido a la mínima dispersión.
- La fibra monomodo es capaz de soportar expansiones futuras del sistema.

Algunas de las ventajas que presenta la fibra multimodo son:

- Mayor capacidad de acoplamiento del emisor a la fibra.
- La conectorización es más barata ya que no se requiere la alta precisión de la fibra monomodo.

Los recubrimientos más comunes en fibras ópticas para sensores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Recubrimiento de fibras ópticas transductoras

Característica	Tipo de sensor			
	Acústico	Magnético	Térmico	Eléctrico
Recubrimiento	Elastómero Polietileno Nylon	Magneto-restrictivo Aleación de níquel Vidrio metálico	Expansión térmica Níquel Aluminio	Piezoeléctrico Polímero de cobre
Modo de aplicación	Extrusión	Electroplating Evaporación Choque de iones	Electroplating Deposición de vapores	Extrusión
Consideraciones especiales		Cocimiento		Orientación molecular

### 2.1.5 Consideraciones de receptores

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El transmisor emite la luz con la mayor fidelidad posible. Pero una vez dentro de la fibra existen muchos factores que degradan la calidad de la señal, entre ellos están la pérdida de potencia en los acoplamientos, la dispersión en la fibra, la atenuación, la retrodispersión, etc.; por lo tanto el diseño del receptor es mucho más complicado que el diseño del transmisor, ya que el primero debe ser capaz de regenerar la señal.

De los principales criterios que intervienen en el diseño del receptor están:

- a) Sensibilidad óptica
- b) Simplicidad del circuito
- c) Confiabilidad y estabilidad

Una lista de las principales consideraciones de los detectores se muestran a continuación, en la Tabla 2.5. La sensibilidad del receptor para un dado BER o SNR junto con la potencia del transmisor determinan el rango de operación y las pérdidas en las que pueden incurrir los componentes que integran el sistema.

Tabla 2.5 Características de los detectores

<b>Opciones</b>	Fotodiodo PIN, Fotodiodo APD
<b>Materiales</b>	Silicio, Germanio, InGaAs
<b>Parámetros</b>	Diámetro efectivo de detección Ancho de banda de detección (velocidad de respuesta) Sensibilidad Longitud de onda máxima de detección Ancho de banda de la luz que incide Voltaje de operación Potencia consumida Factor de fotomultiplicación y ruido Corriente de oscuridad Control de retroalimentación Costo, disponibilidad y capacidad del mejoramiento
<b>Circuito receptor</b>	Preamplificador y amplificador principal Filtrado del ruido, Limitaciones del ruido Fidelidad del sistema (BER, SNR, etc.) Sensitividad del receptor Potencia consumida Transimpedancia, Alta impedancia

Algunos puntos importantes acerca de los detectores son:

1. El APD es más sensible que el PIN (5 a 15dB).
2. El APD tiene las siguientes desventajas:
  - a) La temperatura influye en la ganancia.
  - b) Se requieren altos voltajes.
  - c) Costo más elevado que un PIN.
  - d) La corriente de oscuridad y el ruido son altos.
3. Los diodos PIN tienen baja sensibilidad, por eso se usan en enlaces cortos.
4. El APD o el PIN de silicio funcionan muy bien para longitudes de onda entre 800 y 900 nm.
5. De 1300 a 1600 nm, el diodo PIN (InGaAs) ofrece buenos resultados. El APD de germanio también es bueno, pero genera mucho ruido todavía.

Las características típicas se muestran en la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Comparación de las características típicas de los fotodetectores

Parámetro	Diodos PIN			APDs	
	Si	Ge	InGaAs	Si	Ge
Ancho de banda, $\mu\text{m}$	0.4-1.1	0.5-1.8	1-1.6	0.4-1.1	0.5-1.65
Longitud de onda de mayor sensibilidad, $\mu\text{m}$	0.85	1.5	1.26	0.85	1.5
Eficiencia cuántica, %	80	50	70	80	80
Tiempo de subida, ps	50	300	100	300	500
Voltaje de polarización, V	15	6	10	170	40
Sensibilidad, A / W	0.5	0.7	0.4	0.7	0.6
Factor de multiplicación	1	1	1	80-150	80-150

El receptor debe extraer la señal óptica de las variaciones de ruido y reconstruir la información correctamente. En el caso de los sensores, la recepción es particularmente crítica pues el objetivo del receptor no solo es eliminar el ruido indeseado, sino preservar las débiles variaciones que trae la información del sensado. Muchas veces el ruido se confunde con esas variaciones.

La siguiente tabla lista algunas fuentes de ruido y degradación que limitan el funcionamiento de los receptores.

Tabla 2.7 Elementos de ruido y degradación

	Ruido	Fuente de Ruido	Característica
Receptor	Ruido cuántico	Detector	Ruido fundamental
	Ruido de disparo Corriente de fuga	Detector	
	Ruido por amplificación	Detector	Ruido de los fotodiodos de avalancha
	Ruido térmico de la resistencia	Resistencia de retroalimentación	
	Ruido térmico o de disparo de componentes activos	Transistores bipolares o FETS	
Fuente y Media	Ruido modal	Láser y fibra multimodo	Crece con la distancia o la frecuencia
	Partición de modos	Dispersión cromática del medio	Dominante para fibras monomodo
Factor de Degradación	Ancho de banda de la fuente Ancho de banda de la fibra Defectos del filtro		

### 2.1.6. Consideraciones de modulación

La modulación puede ser análoga o digital. Las técnicas que pueden ser implementadas bajo la categoría análoga son:

1. Modulación directa de la intensidad luminosa de la fuente.
2. Modulación eléctrica usando uno de los siguientes parámetros como variable:
  - a) Intensidad
  - b) Frecuencia
  - c) Fase
3. Modulación análoga de pulsos usando uno de los siguientes parámetros como variable:
  - a) Amplitud
  - b) Ancho
  - c) posición
  - d) Frecuencia

La modulación digital más usada es la técnica PCM (pulse-code modulation) o Modulación de Pulsos Codificados. Esta puede ser:

- a) De 2 estados: OOK (on-off keying)
- b) De varios niveles en combinación con ASK (amplitude-shift keying) o Modulación por variación de amplitud

Las ventajas de PCM son:

1.- Intrínsecamente el sistema digital ofrece más ventajas que el sistema análogo, ya que es más fácil tener un criterio para decidir entre dos niveles de potencia que entre un continuo.

2. - Las fuentes de luz actuales se pueden modular a altas velocidades, con lo que es posible transmitir en banda base los pulsos generados.

Además, por el criterio de 1's y 0's, la no-linealidad de las fuentes se puede despreciar.

3. - Un sistema digital PCM de fibra óptica puede manejar todos los tipos de información (voz, datos, video, etc.). Cada una de estas señales puede ser codificada para producir su propio tren de pulsos. Los diferentes trenes pueden ser re combinados en una sola fibra, mediante un circuito manejador que controle el sistema.

4. - Como se debe decidir entre unos y ceros, la forma particular de onda de corriente y del pulso óptico no es muy relevante a diferencia de la señal análoga, en la que la forma se debe conservar lo más posible a fin de no incrementar la relación SNR.

Las desventajas de PCM son:

1. - Cuando se transmite información análoga digitalmente, primero se convierte la señal análoga a un tren de pulsos de al menos el doble de la mayor frecuencia de la señal original. Entonces, a partir de estos pulsos, se genera un tren de pulsos binarios PCM. El resultado final es que se requiere un mayor ancho de banda para transmisión PCM que el que se requería originalmente para la transmisión análoga.

2. - Las señales análogas deben ser codificadas antes de entrar a un sistema de transmisión PCM.

3. - Los sistemas digitales presentan circuitería muy diferente de los análogos, esto es particularmente crítico en los circuitos de control de ruido.

4. - El costo y la complejidad del sistema se incrementan debido a las conversiones análogo-digital y viceversa.

Las desventajas de la modulación análoga son:

1. - Un receptor análogo requiere altos SNR (al menos 40 dB). Es por esto que los sistemas están limitados a bajas frecuencias y distancias cortas.
2. - Se requiere una alta linealidad de la fuente. Los LEDs funcionan mejor que los láseres pero tienen menor potencia de entrada a la fibra y mayor ancho espectral.
3. - Las señales análogas moduladas por intensidad son muy susceptibles de ruido por armónicas en los circuitos excitadores. Se tienen que implementar circuitos que minimicen el efecto.
4. - Las señales moduladas por fase reducen las no linealidades de la fuente, pero entonces se requiere un mayor ancho de banda.

## 2.2 Metodología de diseño de sistemas digitales

La transmisión digital ofrece ciertas ventajas sobre la análoga cuando se considera el efecto del ruido. De hecho la gran ventaja de las señales digitales estriba en su alta inmunidad al ruido.

En esta sección se expone un método genérico para diseñar enlaces punto a punto con transmisión digital. El objetivo es mostrar cómo se toman en cuenta las consideraciones hechas anteriormente al elaborar el diseño.

La Figura 2.2 muestra una tabla de la longitud (L) contra la frecuencia de transmisión (B). Una vez que el producto BL del sistema es conocido, se puede localizar la región de la tabla que corresponda. Estudiando las varias opciones posibles de detectores, transmisores o fibras se puede llegar a diseñar un sistema óptico. En la Figura 2.2 se aprecian siete diferentes regiones que tienen la misma combinación de fuente y fibra. Cada una de las fronteras de las regiones también depende de las aplicaciones particulares.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	
		1-10m	10-100m	100-1000m	1-3 km	3-10 km	10-50 km	50-100 km	>100 km	
B1	<10 kb/s	I					VII			
B2	10-10 kb/s									
B3	100-1000 kb/s						V		V	
B4	1-10 Mb/s									
B5	10-50 Mb/s	II					VI			
B6	50-500 Mb/s									
B7	500-1000 Mb/s	IV								
B8	>1 Gb/s						III			

Figura 2.2 Tabla del BL digital

I: SLED con fibra multimodo de índice escalonado; II: LED o Diodo láser con una fibra multimodo de índice graduado o escalonado; III: Diodo láser o ELED con una fibra multimodo de índice escalonado; IV: Diodo láser o ELED con una fibra multimodo de índice graduado; V: Diodo láser con una fibra multimodo de índice graduado; VI: Diodo láser con una fibra monomodo; VII: Diodo láser con una fibra multimodo de índice escalonado.

### 2.2.1 Procedimiento de diseño

Sin importar la diversidad de aplicaciones, el procedimiento de diseño para un enlace de fibra óptica es similar para todos los casos.

Los siguientes pasos muestran un procedimiento típico para transmisión digital:

1.- Determinar el máximo BER para el sistema. (Para sistemas digitales generalmente se usa un BER de  $1 \times 10^{-6}$ ).

2.- Determinar el producto BL requerido para el sistema. (Se desean transmitir datos a B (Mb/s) a una distancia L y lograr el BER deseado).

3.- Encontrar la región adecuada en la Figura 2.2

4.- Determinar el emisor. Si es APD o LED y encontrar su potencia promedio  $P_s$  en dBm. En la Figura 2.3 se muestra la potencia promedio emitida en función de la velocidad de transmisión. Para diodos láser esta potencia se encuentra entre -10 y 7 dBm, mientras que para LEDs se encuentra entre -10 a -25 dBm.

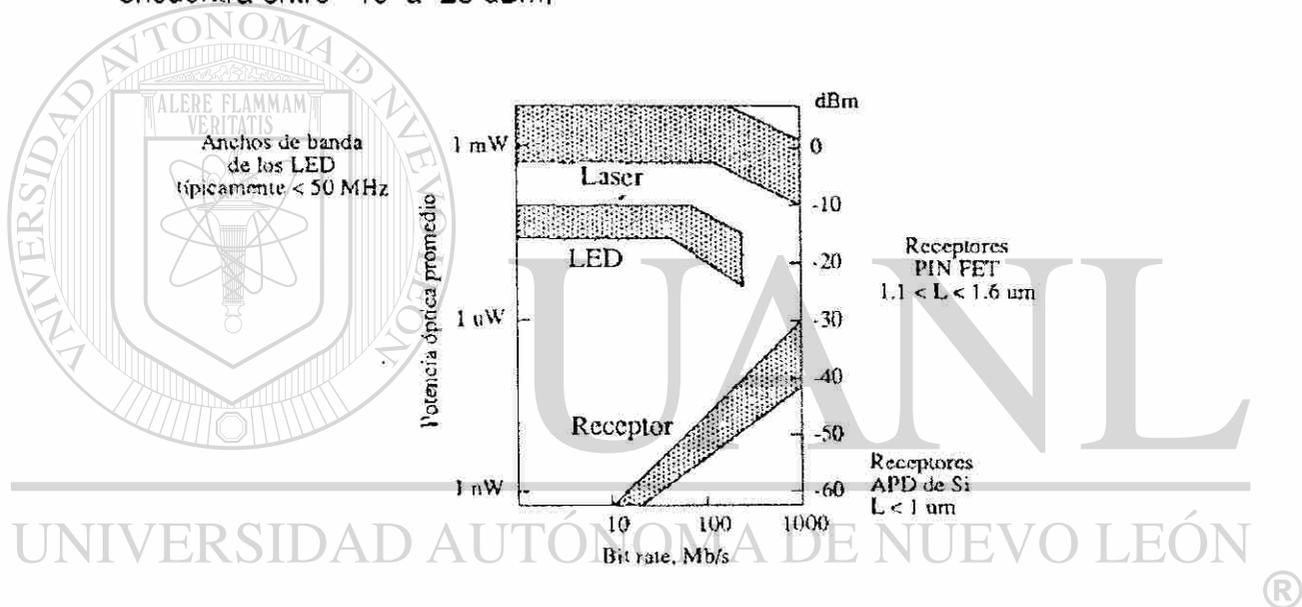


Figura 2.3 Margen de transmisión vs. Bit rate para un sistema digital de fibra óptica. Las sensibilidades típicas para los receptores se muestran a la derecha de la figura.

5. - Determinar la sensibilidad del receptor  $P_R$  para obtener un BER de  $10^{-9}$  a la velocidad requerida, todo en dBm. La sensibilidad para un diodo PIN y un APD también se muestra en Figura 2.3.

6. - Determinar la máxima pérdida permitida  $\alpha_{\max}$  del sistema tomando la diferencia entre  $P_s$  y  $P_R$ .

$$\alpha_{\max} = P_s - P_R \text{ dB}$$

Si por alguna razón el sistema pierde más de  $\alpha_{\max}$  dB, el sistema excede el BER estipulado.

7. - Si es necesario, determinar la pérdida total ( $\alpha_s$ ) de todos los empalmes, en dB.

8. - Determinar la pérdida total ( $\alpha_c$ ) de todos los conectores, en dB.

9. - Determinar el margen de potencia  $\alpha_{\text{MAR}}$  para el sistema en dB. Este se incluye para prevenir pérdidas que no se estén considerando.

10. - Determinar la pérdida ( $\alpha_F$ ) que se puede permitir en la fibra por medio de:

$$\alpha_{\max} - (\alpha_s + \alpha_c + \alpha_{\text{MAR}}) \text{ dB}$$

11. - Determinar el coeficiente de atenuación del cable ( $\alpha_N$  dB/km) para la longitud de onda que se ha seleccionado en el emisor.

12. - Determinar la distancia máxima  $L_{\max}$  entre repetidores por medio de:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$L_{\max} = \frac{\alpha_F}{\alpha_N} \text{ Km}$$

13. - Si  $L_{\max} \geq L$ , entonces el sistema es satisfactorio.

14. - Si  $L_{\max} < L$ , entonces el sistema no cumple con las condiciones y el diseñador tiene que verificar los parámetros que son susceptibles de cambios.

### 2.2.2 Ejemplo de diseño

Para ejemplificar la aplicación del método se muestra un ejemplo de diseño de un enlace de corta distancia aplicable directamente a sensores. Generalmente se habla de distancias menores a un kilómetro y con frecuencias de transmisión bajas. El diseño del ejemplo puede soportar aplicaciones de hasta 10 Mb/seg que está sobrado para muchas de las aplicaciones de sensores.

Los anchos de banda típicos para diversas fibras son:

- Multimodo de índice escalonado = 100 Mhz/ KM
- Multimodo de índice graduado = 1.5 Ghz/ KM
- Monomodo >1 Ghz

Necesidades:

- Una velocidad de transmisión  $B = 10$  Mb/ seg
- Longitud de transmisión máxima  $L = 1$  Km

Esto cae en la región 1; por lo tanto se aplica a cualquier caso en que  $L$

$< 1$  km y  $B < 10$  Mb/seg.

Fuente: SLED, GaAlAs,  $\lambda = 820$  nm (bajo costo)

Fibra: Multimodo de índice graduado (bajo costo, 100 Mhz / km)

Detector: De silicio, PIN o APD (se refiere PIN, por bajo ruido y costo)

Análisis de pérdidas:

$P_s = -12$  dBm

$P_R = -60$  dBm

Máxima pérdida posible  $\alpha_{\max} = 48$  dB

Pérdidas por empalmes  $\alpha_E = 1$  dB

Pérdidas por conectores  $\alpha_C = 2$  dB

Márgen de seguridad  $\alpha_{\text{mar}} = 10$  dB

Pérdidas posibles para la fibra	$\alpha_F = 48 - (1 + 2 + 10) \text{ dB} = 35 \text{ dB}$
Atenuación típica a 820 nm	$\alpha_N = 12 \text{ dB/km}$
Por lo tanto la máxima longitud	$L_{\max} = (35/12) \text{ km} \approx 3 \text{ km}$

Como la distancia es 1 km, el sistema es satisfactorio.

Áreas de aplicación para este ejemplo:

1. - Sensor industrial con protección de interferencia electromagnética

B= Voltaje de directa de 1 Mb/s

L= 50 km

BL  $\approx$  0.05 (Mb/s)/km

Fuente: SLED (660 nm)

Fibra: Plástica multimodo de índice escalonado

Detector: PIN (silicio)

Interfase: TTL

2. - Controlador programable

B= Voltaje de directa de 2 Mb/s

L= 2 km

BL = 4 (Mb/s)/km

Fuente: SLED (660 nm)

Fibra: Vidrio multimodo de índice graduado

Detector: PIN (silicio)

Interfase: TTL

3.- RS-232 Extender-Multiplexer

B= 19.2 Kb/s por canal (1 a 26 canales)

L= 3 km

BL = 0.576 (Mb/s)/km (por canal)

Fuente: SLED (660 nm)

Fibra: vidrio multimodo de índice graduado

Detector: PIN (silicio)

Interfase: RS-232

# CAPÍTULO 3

## PROPIEDADES Y CARACTERISITCAS BASICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

### 3.1 Propiedades de las fibras ópticas

En éste capítulo se definen las propiedades básicas de las fibras ópticas enfatizando sobre todo los conceptos más importantes usados en la tecnología de los sensores de fibra óptica. La estructura de las fibra óptica es realmente simple, como se muestra en la figura 3.1. Las fibras ópticas pueden ser definidas como una rama de la óptica con división en la comunicación para la transmisión de la luz y frecuencias infrarrojas generadas por un LASER o LED'S a través de fibras transparentes de vidrio o de plástico.

Las fibras ópticas son filamentos generalmente en forma cilíndrica, que consisten en un núcleo de vidrio y un revestimiento de vidrio o plástico.

**Núcleo (core)**

Es la sección a través de la cual viaja el haz de luz.

**Revestimiento (cladding)**

Es la capa que rodea al núcleo. Su función principal es reflejar la luz hacia el centro de la fibra atrapándola en el núcleo.

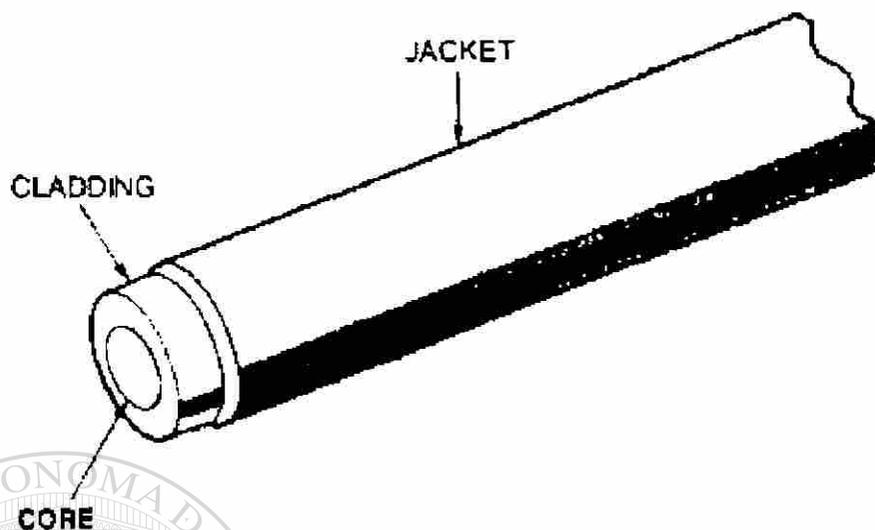


Figura 3.1 Estructura básica de una fibra óptica

Tanto el núcleo (core) como el revestimiento (cladding) están conformados ambos de vidrio o plástico. Con la combinación de estos materiales se forman tres tipos de Fibra Óptica:

- a) Núcleo de plástico con revestimiento de plástico
- b) Núcleo de vidrio con revestimiento de plástico
- c) Núcleo de vidrio con revestimiento de vidrio

En el caso del plástico, el núcleo puede ser de polietileno o polimetil metacrílico; generalmentees silicón o teflón.

El vidrio está constituido básicamente de sílica, la cual es encontrada en arena.

Para la fabricación de la fibra óptica la sílica debe ser extremadamente pura agregando pequeñas cantidades de partículas de boro, fósforo y germanio es posible cambiar el índice de refracción de la fibra.

En comparación con el vidrio las fibras de plástico son más económicas y flexibles. Además son más fáciles de instalar y conectar, resisten grandes tensiones en comparación con las fibras de vidrio. Como desventaja principal está la mala transmisión de la luz, esto ocasiona grandes pérdidas por lo que se recomienda el uso del vidrio para el núcleo de la fibra.

En un sistema de fibras ópticas se unen tres partes para llevar a cabo esta tarea de comunicación: una fuente de luz (transmisor), una fibra óptica y un detector de luz (receptor). La fuente de luz puede ser de un diodo semiconductor láser o de un diodo emisor de luz (LED). Las fibras ópticas pueden ser de un tamaño corto como 1m. o uno largo como de 10 km. El detector de luz puede ser un fotodiodo PIN (Positivo Intrínseco Negativo) o un APD (Fotodiodo de Avalancha). Cada uno de estos dispositivos se discutirán mas adelante.

Un sistema de Fibras Ópticas simple, convierte una señal eléctrica a una señal de luz dentro de una fibra óptica o entonces captura la señal en el final cuando es reconvertida en una señal eléctrica.

Son dos los tipos de modulación de onda posibles: Analógica y Digital. En la modulación analógica la intensidad de la luz irradiada por el láser o el LED es variablemente continua. La modulación digital es de forma contraria.

La intensidad es cambiada impulsivamente de un modo ON/OFF. Al transmitir luz ON y OFF es una velocidad extremadamente rápida. El modelo mas típico de modulación de pulsos es el PCM.

La modulación digital es más popular ya que permite una transmisión a una gran distancia con el mismo poder de modulación analógica.

### 3.1.1 Ventajas y desventajas de la fibra optica

Las ventajas más notables son aquellas derivadas del amplio ancho de banda y de las bajas pérdidas de la fibra óptica. Existen otras ventajas motivadas por las propiedades físicas de la fibra óptica, por ejemplo, la inmunidad a la interferencia inductiva o eléctrica, la cual la hace idónea para enlaces de telemetría o de datos en ambientes adversos. La tabla 3.1 nos muestra algunas propiedades y beneficios de la fibra óptica como guía de onda. A continuación se detallarán algunas de las cualidades de la fibra óptica:

Propiedades	Beneficios
Bajas pérdidas	Menor número de repetidores
Alta anchura de banda	Bajo costo por canal
Pequeño tamaño, bajo precio y flexibilidad	Facilidad de instalación y transporte
Resistencia a las radiaciones	No precisa apantallamientos
Inmunidad a interferencias electromagnéticas y ausencia de radiaciones	Confiable
Alta estabilidad con la temperatura	Viabilidad como medio de transmisión en condiciones climáticas adversas
Dificultad para captar sus emisiones	Seguridad
Material dieléctrico	Aislamiento eléctrico y disponibilidad de materia prima

Tabla 3.1 Propiedades y Beneficios al utilizar una Fibra Optica

#### 3.1.1.1 Amplio ancho de banda

El empleo del láser y de los LEDs en la comunicación con fibra óptica abre una ventana del espectro electromagnético en frecuencias 10 mil veces superiores a las mayores empleadas en las transmisiones de radio, debido a que la capacidad potencial de información se incrementa de modo directamente proporcional a la frecuencia, el láser hace que sea posible transmitir  $10^{14}$  bps.

### 3.1.1.2 Bajas pérdidas

Puesto que intrínsecamente las pérdidas de las fibras ópticas son bajas (menos de 2.5 dB/Km. a 0.85 micrómetros y 0.5 dB/Km. a 1.3 micrómetros) el distanciamiento entre repetidores resulta multiplicado en comparación con el exigido por los cables metálicos en condiciones de tráfico análogas.

En la actualidad se han superado los 200 Km. entre los puntos de repetición en condiciones experimentales a velocidades de hasta 90 Mb/seg y se han alcanzado mas de 161 Km. para 480 Mb/seg.

### 3.1.1.3 Inmunidad a la interferencia electromagnética

La configuración de los campos electromagnéticos que se propagan en la fibra óptica, es tal que, en la práctica se produce un completo aislamiento con el exterior. Así pues, las fibras ópticas no contribuyen a interferir en otros sistemas, y a la inversa, son inmunes a las interferencias originadas por otros portadores.

### 3.1.1.4 Tamaño y flexibilidad

Un cable de diez fibras ópticas puede tener un diámetro exterior de 8 a 10 mm y ofrecer la misma capacidad de información (aunque con menos repetidores) que un cable coaxial de 10 tubos y 8 cm de diámetro, o de 5 ó 10 cables de 2000 pares de 0.8 mm. La diferencia de tamaño repercute en el peso y la flexibilidad del cable, dado que el material de la fibra óptica es más ligero, existe un ahorro en la instalación y el transporte es en mayor volúmen.

### 3.1.1.5 Aislamiento eléctrico

Las fibras proporcionan un total aislamiento eléctrico entre el transmisor y el receptor. Esto proporciona ciertas ventajas como el no requerir de una tierra común para el transmisor y el receptor; reparar la fibra aunque los equipos no estén apagados; los cables de fibra pueden atravesar zonas con fuertes inducciones sin peligro de descarga eléctrica ni riesgo de que se originen cortos circuitos.

### 3.1.1.6 Seguridad

Puesto que las fibras ópticas no radian energía electromagnética la señal transmitida por ellas no puede ser captada desde el exterior. Algunas aplicaciones militares se basan en esta propiedad.

### 3.1.1.7 Aplicaciones

En la actualidad las fibras ópticas tienen toda una gama de aplicaciones.

A continuación se mencionarán las más importantes.

Campos de aplicación	Características
Red de T.V. por cable.	Amplio ancho de banda.
Comunicaciones en instalaciones de energía eléctrica.	No hay interferencia electromagnética.
Control de plantas nucleares.	Amplio ancho de banda sin peligro de incendio y de interferencias electromagnéticas.
Enlaces entre computadoras.	No existe interferencia electromagnética.
Armas dirigidas.	Peso pequeño
Transmisiones secretas.	Sin radiación electromagnética.
Sensores (Presión/Temperatura).	Alta sensibilidad.

Medicina.	Perfeccionó el endoscopio (aparato que permite explorar el cuerpo humano).
Redes telefónicas públicas.	Amplio ancho de banda.
Conexión telefónica entre islas por medio de cable submarino.	Amplio ancho de banda y garantiza la comunicación aún en condiciones atmosféricas adversas.
Automóviles.	Decrece el peso del cable e incrementa la velocidad de transmisión de signos al tablero.

Tabla 3.2 Campos de Aplicación y Características de las Fibras Ópticas

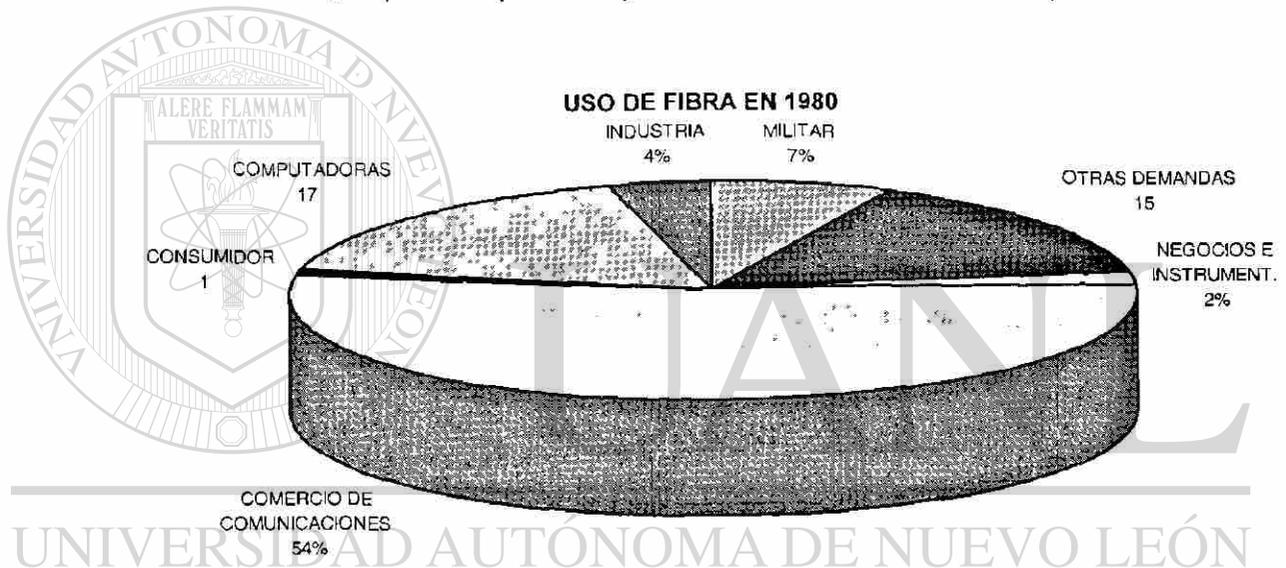


Figura 3.2

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

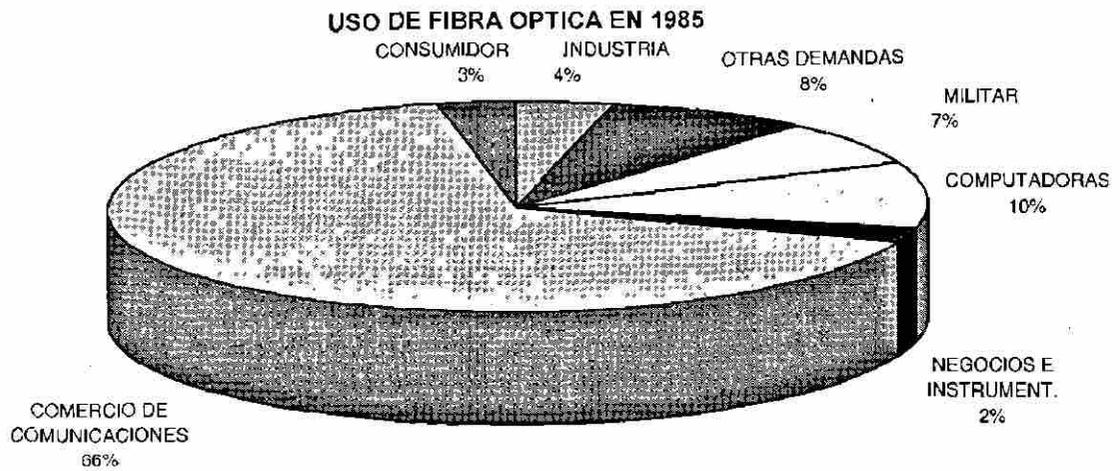


Figura 3.3 Uso de las Fibras Opticas en los Ochentas.

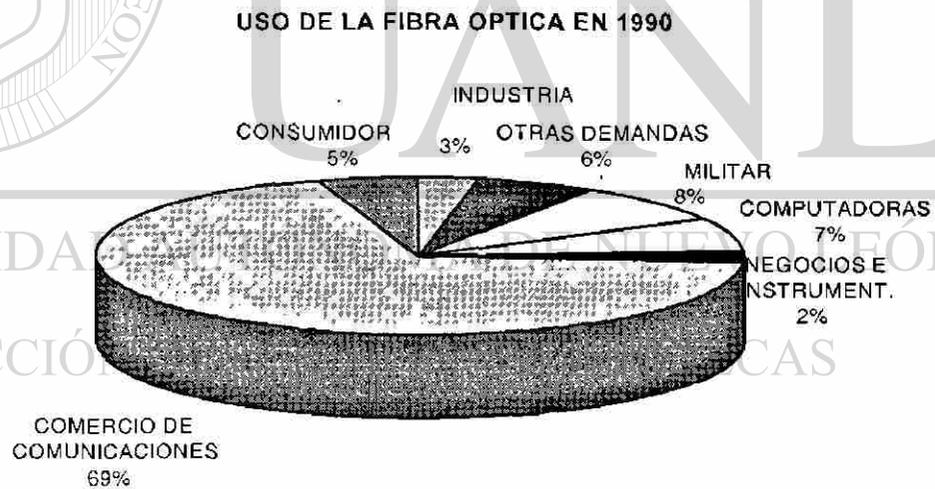


Figura 3.4 Uso de la Fibra Optica en los Noventas

### 3.1.2 Propagación de las ondas de luz

#### 3.1.2.1 Naturaleza ondulatoria de la luz

Gracias a las muchas y valiosas contribuciones al estudio de la naturaleza de la luz, se ha demostrado que se trata de un movimiento ondulatorio transversal de dos campos vectoriales, uno eléctrico y otro magnético, variando con el tiempo, por lo que aceptaremos que la luz es una onda que se propaga en el vacío con una velocidad dada por:

$$C \approx 3 \times 10^8 \text{ m/seg.}$$

La velocidad de propagación depende del medio en el cual se propague la onda. Debido a esto, cuando una onda de luz cambia de medio, su velocidad de propagación se altera.

#### 3.1.2.2 Propagación de la luz

Para estudiar la propagación de la luz en medios transparentes se describen dos fenómenos:

- Reflexión
- Refracción

La reflexión: es el cambio de trayectoria que experimenta un haz de luz al incidir en una superficie reflectora. (ver figura 3.5).

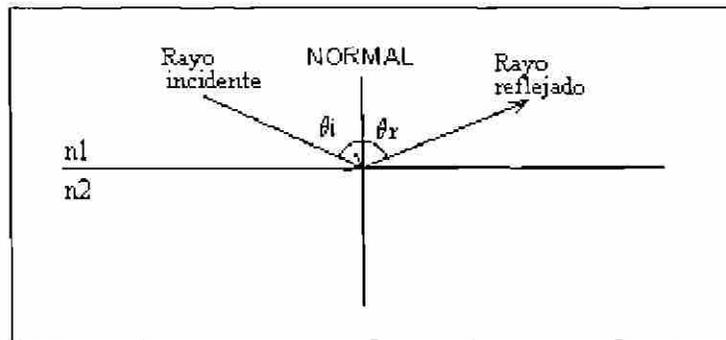


Figura 3.5 Reflexión de la Luz.

La refracción es el cambio de dirección que experimenta un haz al cambiar de un medio de propagación a otro.

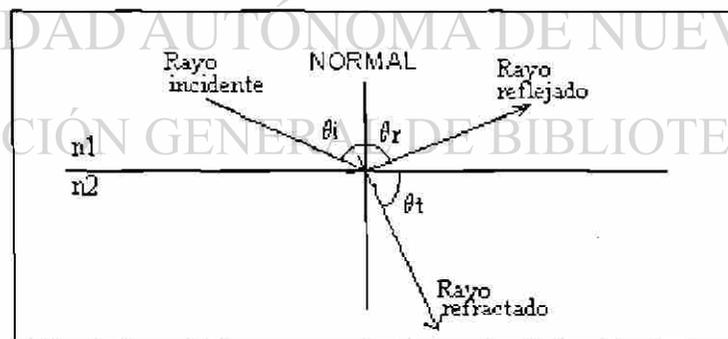


Figura 3.6 Refracción de la Luz.

### 3.1.2.2.1 Leyes de la reflexión

1. - El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado, están en el mismo plano.
2. - El ángulo de incidencia,  $\theta_i$ , es igual al ángulo de reflexión  $\theta_r$ .

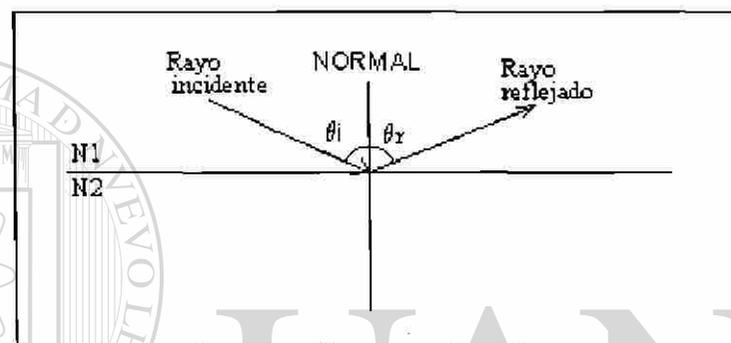


Figura 3.7 Reflexión de la Luz.

### 3.1.2.2.2 Leyes de la refracción

1. - El rayo incidente, la normal, el rayo reflejado y el rayo refractado están en el mismo plano.

2. - El ángulo de incidencia  $\theta_i$ , y el ángulo de refracción  $\theta_t$ , están relacionados por:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad \text{Ecuación conocida como Ley de SNELL}$$

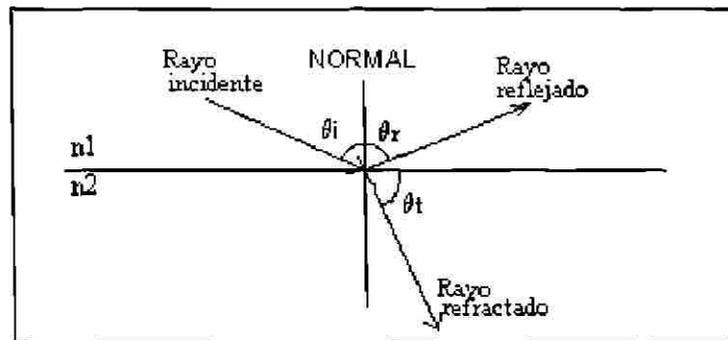


Figura 3.8 Reflexión de la Luz.

Cuando hay un haz de luz que pasa a propagarse de un medio ópticamente menos denso (de menor índice de refracción) a otro más denso (de mayor índice de refracción), entonces el rayo refractado se acerca a la normal. Esto se muestra en la siguiente figura:

Si  $n_1 < n_2$ , entonces  $\theta_i > \theta_t$ .

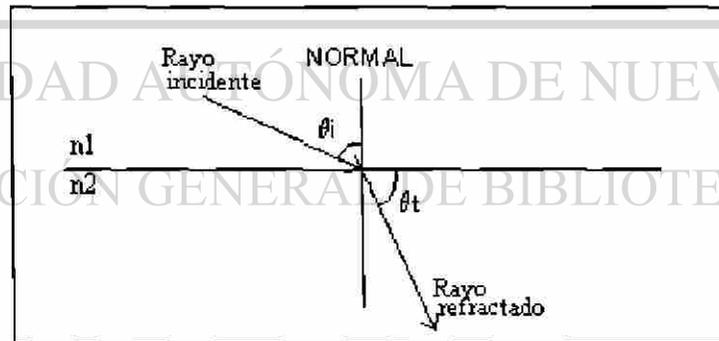


Figura 3.9 Efecto de la refracción de la Luz en medios menos densos.

Cuando un haz de luz se propaga de un medio ópticamente más denso a otro menos denso, el rayo refractado se aleja de la normal; esto se muestra en la siguiente figura

Si  $n_1 > n_2$ , entonces  $\theta_i > \theta_t$

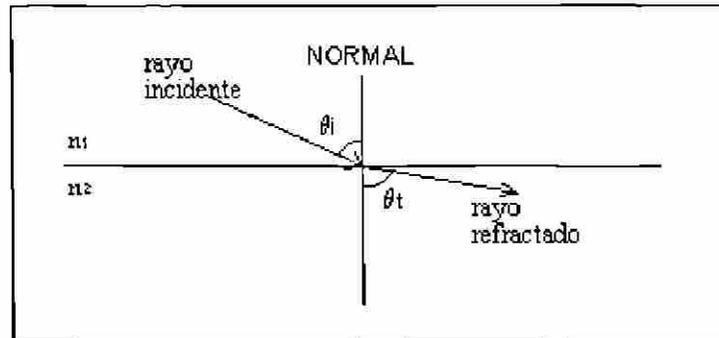


Figura 3.10 Efecto de la refracción de la luz en medios más densos.

Para un haz de luz que viaja con un medio de índice de refracción mayor a otro con índice de refracción menor, existe un ángulo crítico, para el cual la luz no se transmite al otro medio sino que se propaga por la interface.

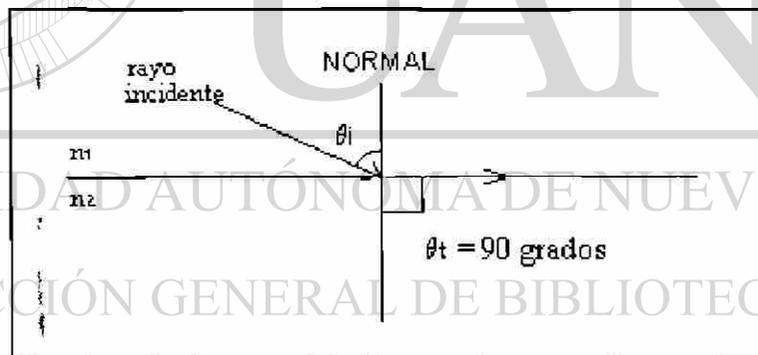


Figura 3.11 Angulo Crítico.

Para obtener este ángulo crítico hacemos que:

$$\theta_i = \theta_c$$

entonces:

$$\theta_t = 90 \text{ grados}$$

y por la ley de Snell:

$$n_1 \sin(\theta_c) = n_2 \sin(\theta_t)$$

como  $\theta_t = 90$  grados, entonces

$$n_1 \sin(\theta_c) = n_2 \sin(90)$$

$$n_1 \sin(\theta_c) = n_2$$

por lo tanto:

$$\sin(\theta_c) = n_2/n_1.$$

Siempre que  $n_1 > n_2$  se cumple que:

\* Para cualquier ángulo  $\theta_i < \theta_c$ , la luz se propaga al otro medio.

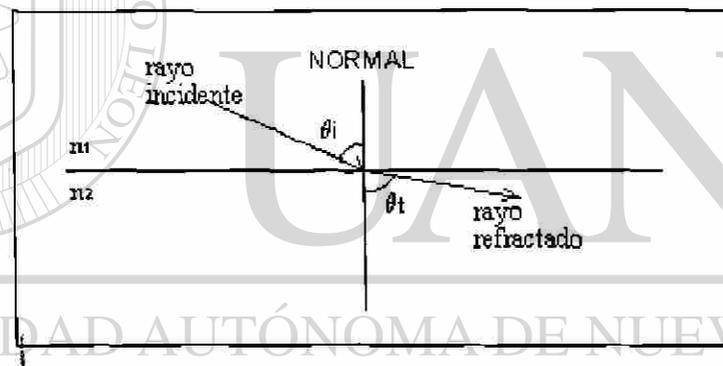


Figura 3.12 Propagación de la luz en distintos medios.

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

\* Para cualquier ángulo  $\theta_i > \theta_c$ , la luz se refleja totalmente.

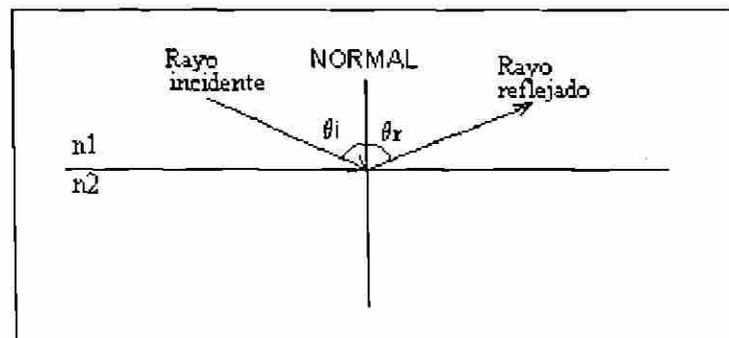


Figura 3.13 Principio básico de la propagación dentro de la fibra óptica.

La siguiente figura nos muestra el fenómeno de refracción en dos medios de distinto índice de refracción.

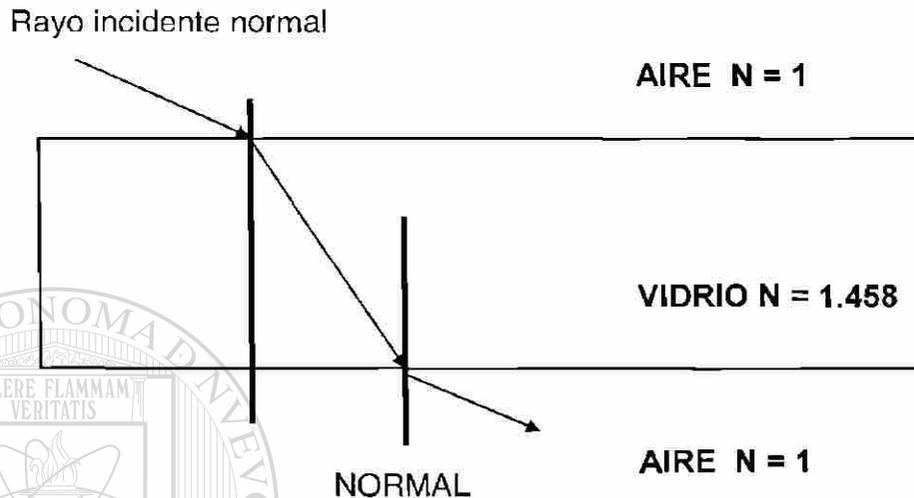


Figura 3.14 Efecto de la propagación de la luz en distintos medios.

### 3.1.2.3 Índice de refracción (N)

Una de las características de cualquier material ópticamente transparente es la velocidad con la cual viaja la luz en dicho material; esta se caracteriza por una constante matemática llamada índice de refracción.

El índice de refracción es la razón de la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ) para la velocidad de la luz en ese material ( $v$ ). Expresado en forma matemática nos queda:

$$N = \frac{\text{Velocidad de la luz en el vacío } (c)}{\text{Velocidad de la luz en otro medio}} \quad ; \quad N = c/v$$

Medio	N
Aire	1.000294
Helio	1.000036
Hidrógeno	1.000132
Agua	1.333
Alcohol	1.361
Diamante	2.419
Ámbar	1.55
Sílice Fundida	1.458

Tabla 3.3 Relación entre medio e índice de refracción de distintos medios.

#### 3.1.2.4 Apertura numérica

La apertura numérica es la medida de la habilidad de aceptación de la luz de la fibra. La luz será aceptada y propagada si entra al núcleo en un ángulo mayor al ángulo crítico.

El ángulo máximo que puede tener se le conoce como máximo ángulo de aceptación, ya que si se excede de este valor, dejará de ocurrir la reflexión total interna y el haz se refractará en el recubrimiento.

Las aperturas numéricas muy grandes se relacionan con una alta eficiencia para su acoplamiento, permitiendo solo pérdidas bajas en los empalmes, las conexiones y en la potencia.

La siguiente figura nos muestra la apertura numérica de una fibra óptica.

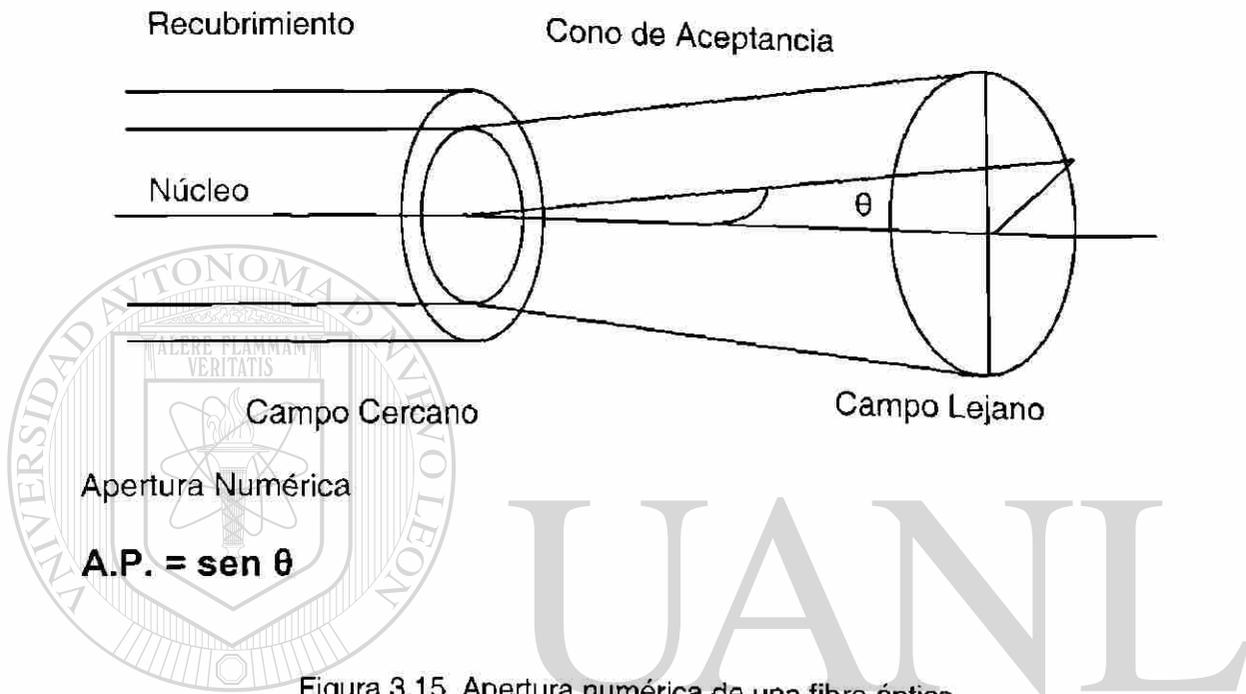


Figura 3.15 Apertura numérica de una fibra óptica.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 3.1.3 Modos de propagación

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

El modo de propagación se refiere en esencia a los caminos ópticos que sigue la luz dentro de la fibra.

El modo de propagación se determina básicamente de acuerdo a la frecuencia, el diámetro del núcleo y la variación del índice de refracción; sin embargo el tipo de fibra también es otro factor a considerar en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de la fibra.

### 3.1.3.1 Designación e identificación de los modos

La propagación de las ondas de luz están confinadas en el núcleo de la fibra. Aquellos modos cuyo campo  $E_z$  es más fuerte comparado con el campo magnético  $H_z$  a lo largo de la dirección de propagación, se les llama modos **EH**.

Aquellos modos cuyo campo **HZ** es más fuerte comparados con los del campo eléctrico **EZ** a lo largo de la dirección de propagación, se les llama modos **HE**. Estos modos (**EH** y **HE**) tienen seis componentes de campo y no poseen simetría circular. Dependiendo de la forma en que se propaguen los modos dentro de la fibra óptica serán del tipo monomodo o multimodo.

## 3.2 Fabricación de una fibra óptica

### 3.2.1 Construcción

Para la fabricación de la fibra óptica deben utilizarse materiales que cumplan con las características mecánicas y ópticas deseadas en la fibra. Dicho material debe satisfacer los siguientes requisitos:

1. Que pueda ser transformado en fibras largas, delgadas y flexibles.
2. Que sea transparente en una longitud de onda particular para que la fibra conduzca eficientemente la luz.
3. Se deben escoger materiales físicamente compatibles entres sí, pero con pequeñas diferencias en sus índices de refracción.

Para la fabricación de las fibras ópticas de vidrio se utilizan básicamente dos técnicas:

- El proceso de deposición de vapores,
- El método de fusión directa

### 3.2.2 Procesos de fabricación

#### 3.2.2.1 Deposición de vapores

Este proceso tiene su aplicación en la industria de los semiconductores y del vidrio. Se aplica por la pureza y limpieza que logran.

La deposición de vapores consiste en generar vapores de óxido de metales; estos vapores al ser calentados por un quemador de hidróxido forman un polvo fino de cuarzo dopado.

Podemos mencionar una clasificación de dichos métodos:

1. Método de deposición modificada de vapores químicos.
2. Deposición externa de vapores químicos.

---

#### 3.2.2.2 Método de fusión directa o de doble crisol

Este método sigue los procedimientos tradicionales de elaboración del vidrio, en los cuales la fibra óptica es hecha fundiendo directamente los componentes del vidrio.

En el método de fusión directa o de doble crisol, las varillas de vidrio para los materiales que forman el núcleo y revestimiento se elaboran por separado. Primero se procede con la mezcla de polvos de vidrio purificado, los cuales son fundidos en un crisol y agitados hasta formar una mezcla homogénea. Una varilla de alimentación se forma de una varilla semilla que se incorpora por inmersión al vidrio fundido y después se saca lentamente a través de un anillo

enfriador. El vidrio sale después de la varilla semilla solidificándose para tomar una forma cilíndrica de 5 a 10 mm de diámetro y algunos metros de largo.

Para obtener fibras de índice gradual se desplaza la boquilla del crisol externo y así el vidrio del núcleo entra en contacto con el vidrio del revestimiento un poco antes de que se llegue al final de la boquilla del revestimiento desde donde se estira la fibra.

Por último la fibra pasa a la cubierta primaria y a su almacenado. Su producción alcanza varios cientos de metros por minuto.

Las siguientes figuras nos muestran los métodos de fabricación de la fibra óptica más comunes.

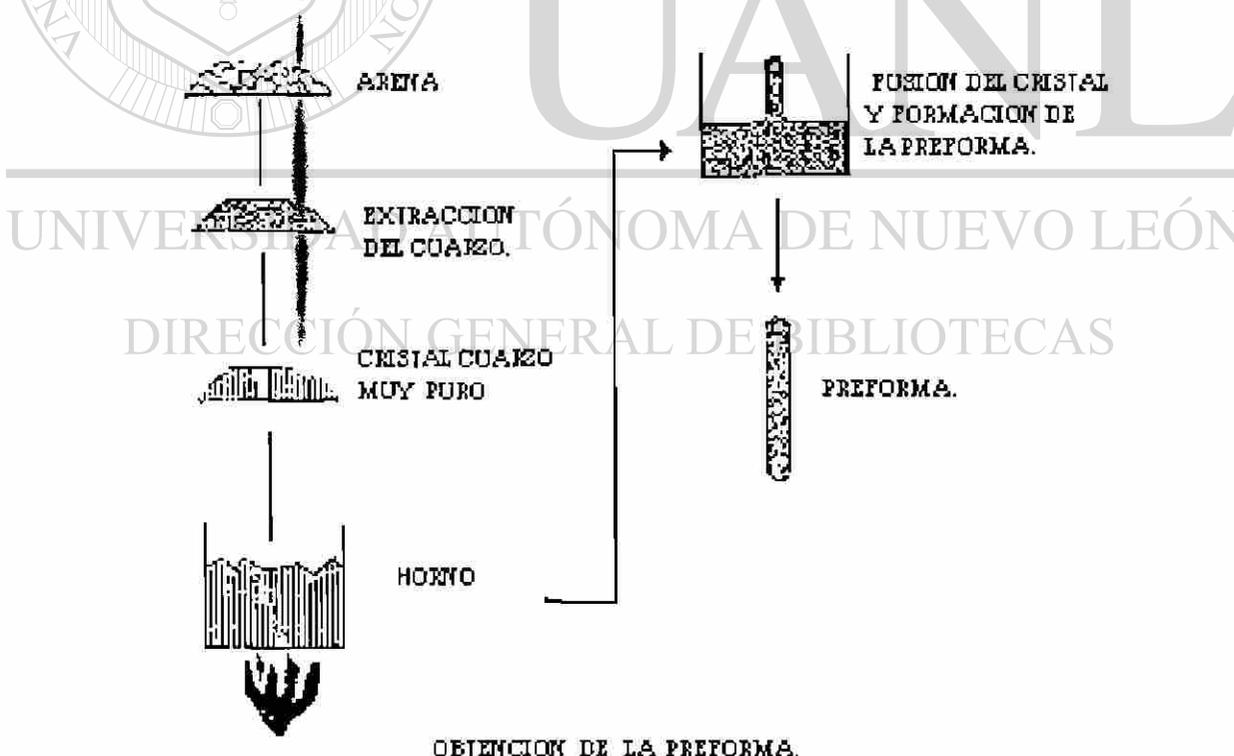


Figura 3.16 Método de fusión directa

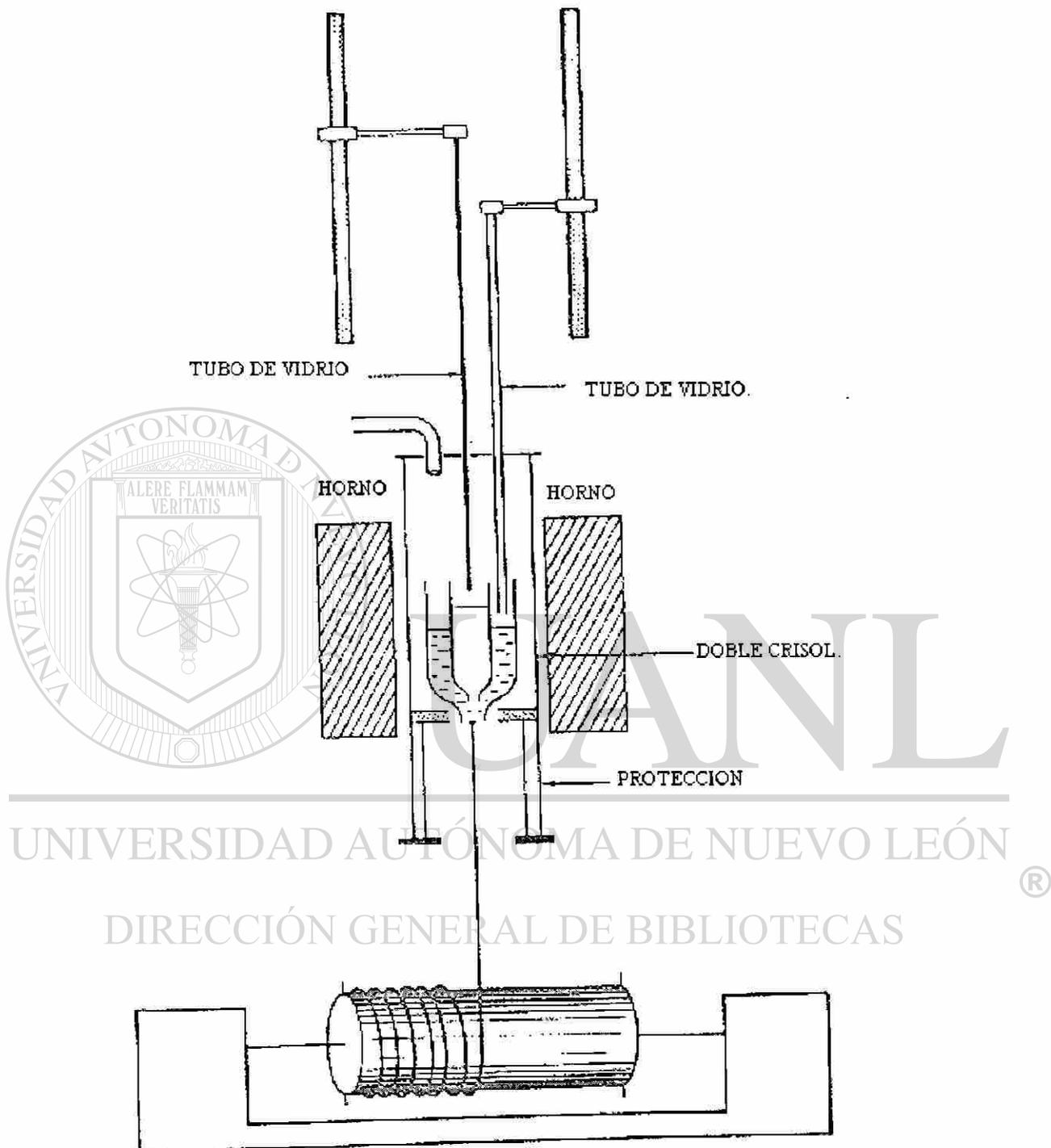


Figura 3.17 Método del doble crisol de k.j. beales

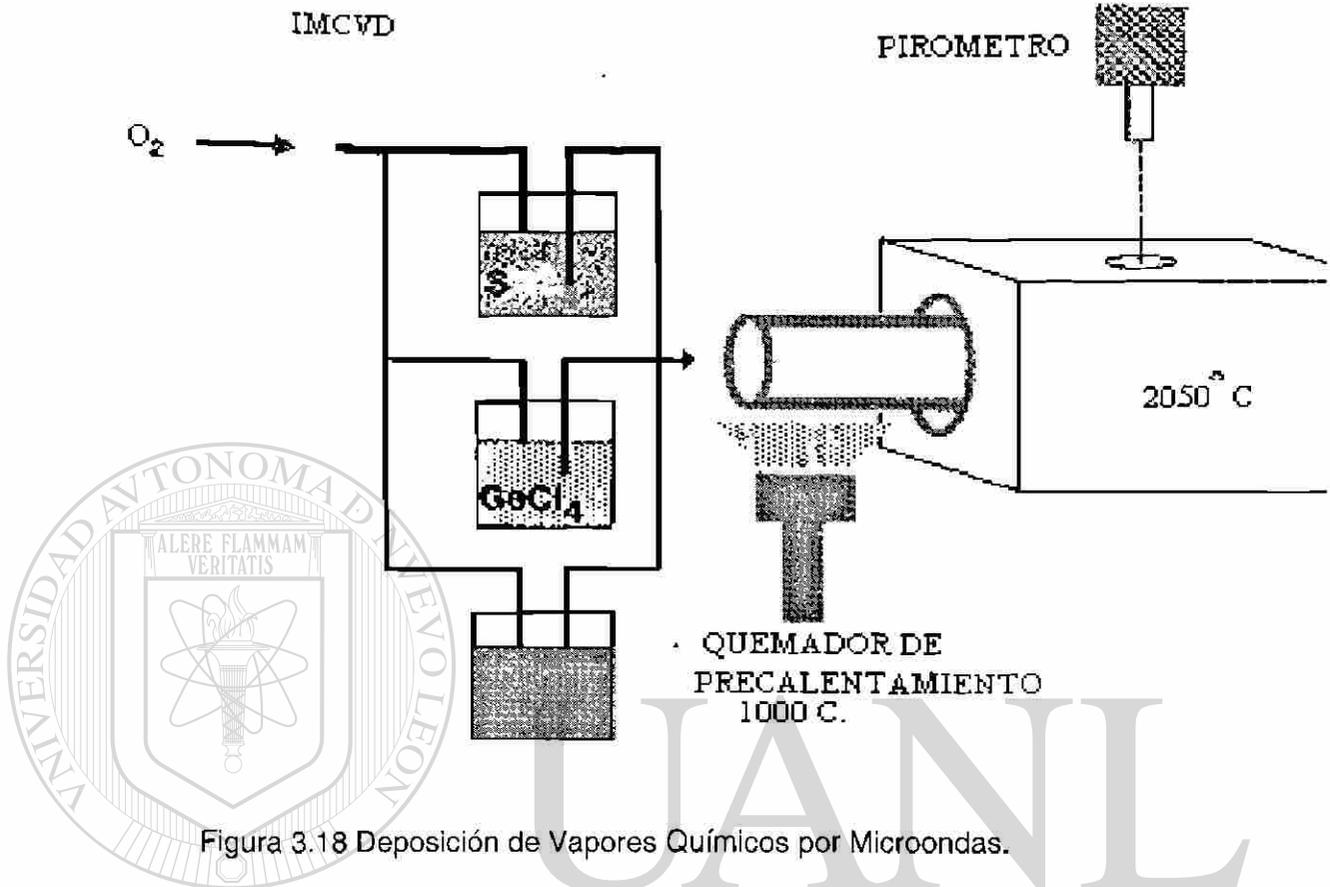


Figura 3.18 Deposición de Vapores Químicos por Microondas.

Desarrollo	Ericsson.	Baja
Temperatura Aplicada.	2050 grados.	Contaminación
Temperatura de Proceso.	1000 grados.	Calentamiento
Razón de deposición.	0.5 - 2.5 gm/min	homogéneo
Número de Capas aplicadas.	100	
Atenuación.	$\ll 1$ db/km	Proceso Discontinuo
Longitud de la Preforma	70 cm	Requiere Tubo de Cuarzo.
Diámetro de la Preforma.	Variable.	Preforma con orificio.
Longitud de Fibra Producida	hasta 50 km.	
Tipo de Fibra Producida.	Mono y Multimodo.	

VAD

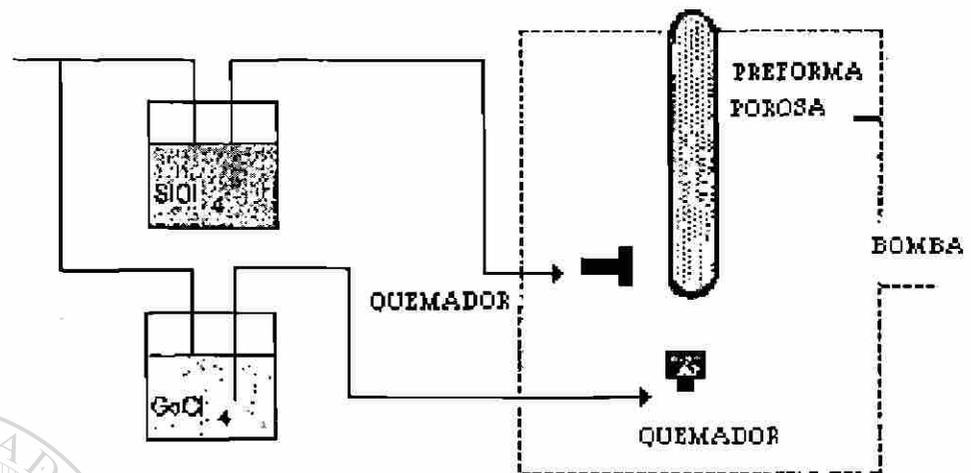


Figura 3.19 Método de Deposición axial de vapores químicos

Desarrollo	NTT
Temperatura Aplicada	1600 grados
Temperatura de proceso	1400 grados.
Razón de deposición.	3.0 gm/min
Número de capas aplicadas.	20 - 40 capas.
Atenuación.	< 1 db /km.
Longitud de la Preforma	ilimitada.
Diámetros de la preforma .	ilimitado.
Longitud de Fibra Producida.	ilimitada.
Tipo de Fibra Producida.	Mono y Multimodo.

Proceso continuo  
 Preforma sin orificio  
 Bajo Índice OH  
 No requiere Tubo  
 Razón de Deposición constante

Dificultad de Control PIR  
 Variaciones en Densidad del tizne.  
 Dificultad en Control de circularidad.

147445

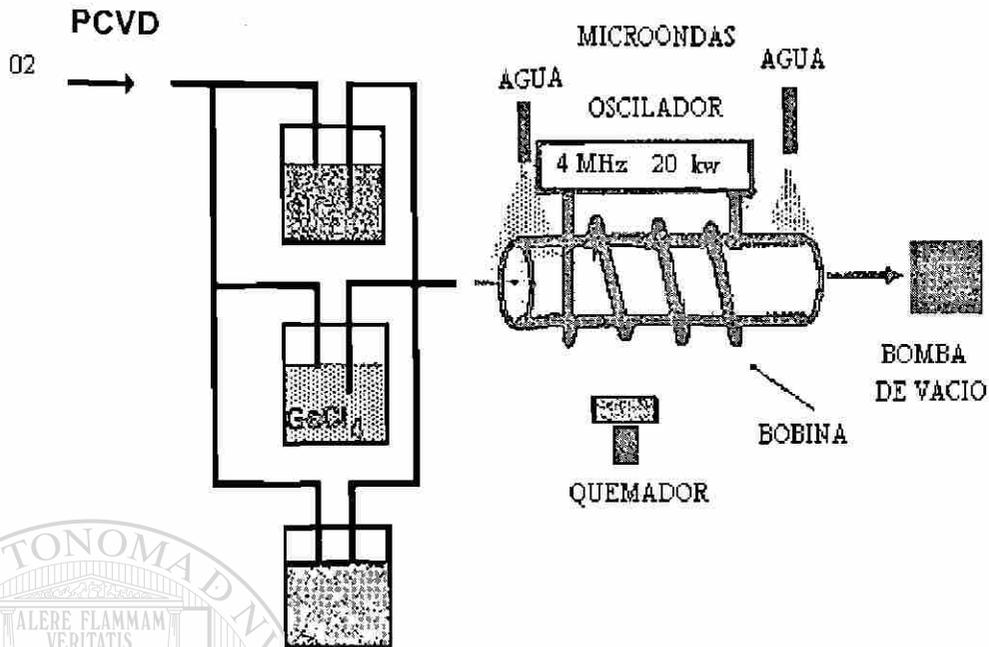


Figura 3.20 Método de Deposición de Vapores por Plasma de Radio Frecuencia

Desarrollo	Phillips
Temperatura Aplicada	2000 grados
Temperatura de proceso	1000 grados
Razón de deposición.	6 gm/min
Número de capas aplicadas.	1000.
Atenuación.	<< 1 dB/km
Longitud de la Preforma.	70 cm
Diámetros de la preforma.	60 mm
Longitud de Fibra Producida.	50 km.
Tipo de Fibra Producida.	Mono y Multimodo.

Baja contaminación  
Alta eficiencia de deposición

Proceso discontinuo  
Requiere tubo de cuarzo  
Preforma Limitada.  
Preforma con orificio.  
Proceso costoso.

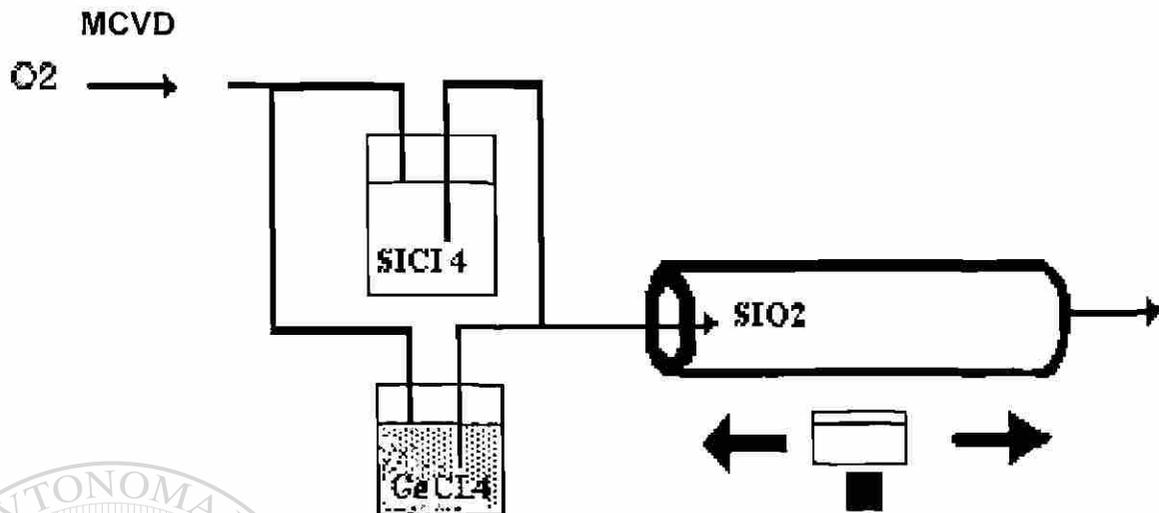


Figura 3.21 Deposición Modificada de Vapores Químicos

Desarrollo	Bell laboratories
Temperatura Aplicada	1600 grados
Temperatura de proceso	1900 grados
Razón de deposición.	0.5-2.0 gm/min
Número de capas aplicadas.	50 - 100
Atenuación.	< 1 dB/km
Longitud de la Preforma	60 cm
Diámetros de la preforma .	15 mm
Longitud de Fibra Producida.	8 km
Tipo de Fibra Producida.	Mono y Multimodo.

Baja contaminación.  
 Elimina OH por barrera  
 Flexible, versátil,  
 Fácil de instalar  
 Fácil control sobre el índice refracción.

Proceso Discontinuo  
 Requiere de Tubo de Cuarzo  
 Baja eficiencia de Deposición  
 Preforma de Tamaño limitado  
 Preforma con orificio central.

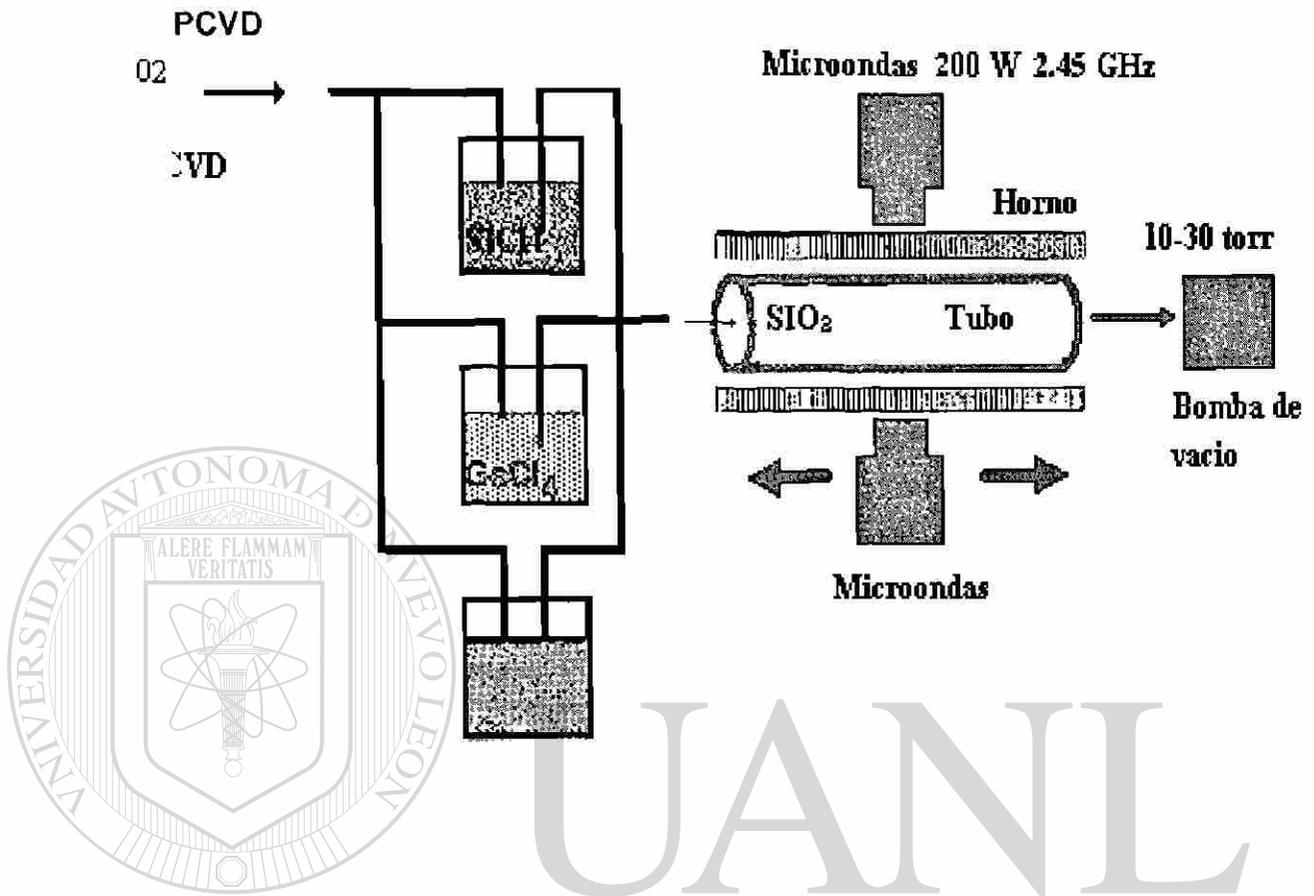


Figura 3.22 Método de Deposición de Vapores por Plasma

Desarrollo	Phillips
Temperatura Aplicada	2000 grados
Temperatura de proceso	1000 grados
Razón de deposición	0.5-2.5 gm/min
Número de capas aplicadas	2000
Atenuación	$\ll 1$ dB/km
Longitud de la Preforma	70 cm
Diámetros de la preforma	20 mm
Longitud de Fibra Producida	10 km
Tipo de Fibra Producida	Mono y Multimodo

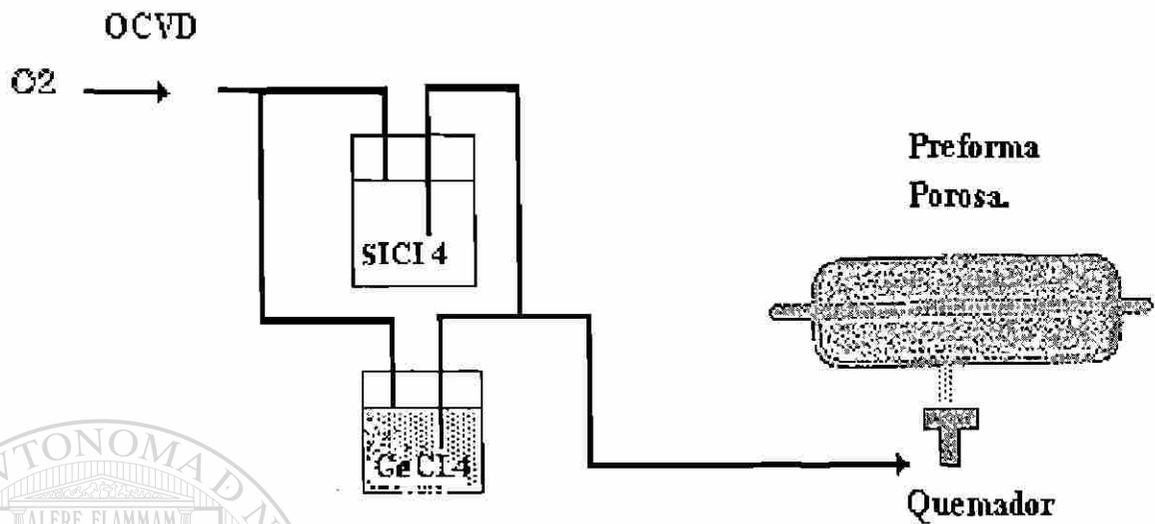


Figura 3.23 Método de Deposición Externa de Vapores Químicos.

Desarrollo	Corning Glass
Temperatura Aplicada	1500 grados
Temperatura de Proceso	1800 grados
Razón de deposición	2.5-5.0 gm/min
Número de capas aplicadas	200
Atenuación	< 1 dB/km
Longitud de la Preforma	Limitado
Diámetros de la preforma	No tiene limite
Longitud de Fibra Producida	50 km
Tipo de Fibra Producida	Mono y Multimodo

Control sobre PIR  
No se requiere tubo.  
Preformas grandes.  
Control sobre dimensiones

Proceso Discontinuo  
Alta A.N  
Control complejo de Deposición  
Fibras con fracturas por shock  
Preforma con orificio  
Proceso costoso

### 3.3 Fuentes de luz de fibra óptica de estado sólido

#### 3.3.1 Dispositivos para la emisión y detección de luz

##### 3.3.1.1 Fotoemisores

Los fotoemisores que se utilizan en un sistema de comunicación son el LED (diodo emisor de luz) y el diodo láser de inyección.

El LED se clasifica en:

- Diodo Emisor de Superficie
- Diodo Emisor Lateral

##### 3.3.1.2 Diodo emisor de superficie (SLED)

El diseño de este tipo de LED se construye con una área de emisión pequeña ( $15\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$  de diámetro) sumergido en un material semiconductor con el fin de disipar el calor eficientemente.

La separación de la superficie emisora es angosta para minimizar pérdidas por absorción. En este tipo de diodo, la radiación es constante en todas direcciones; esencialmente es isotrópica y con una distribución de emisión de  $120^\circ$ .

##### 3.3.1.3 Diodo emisor lateral (ELED)

Este tipo de diodo utiliza una doble heterounión para confinar a los fotones en una capa angosta; la mayor parte de la radiación es por la capa reflectora, lo cual hace que la radiación efectiva sea muy alta.

Este tipo de diodo se utiliza con mucha eficiencia en una fibra con una apertura numérica pequeña comparada con la superficie emisora.

Una característica de los LED's es su salida espectral, la salida espectral se considera un proceso aleatorio Gaussiano. La siguiente gráfica muestra la intensidad relativa en función de la longitud de onda.

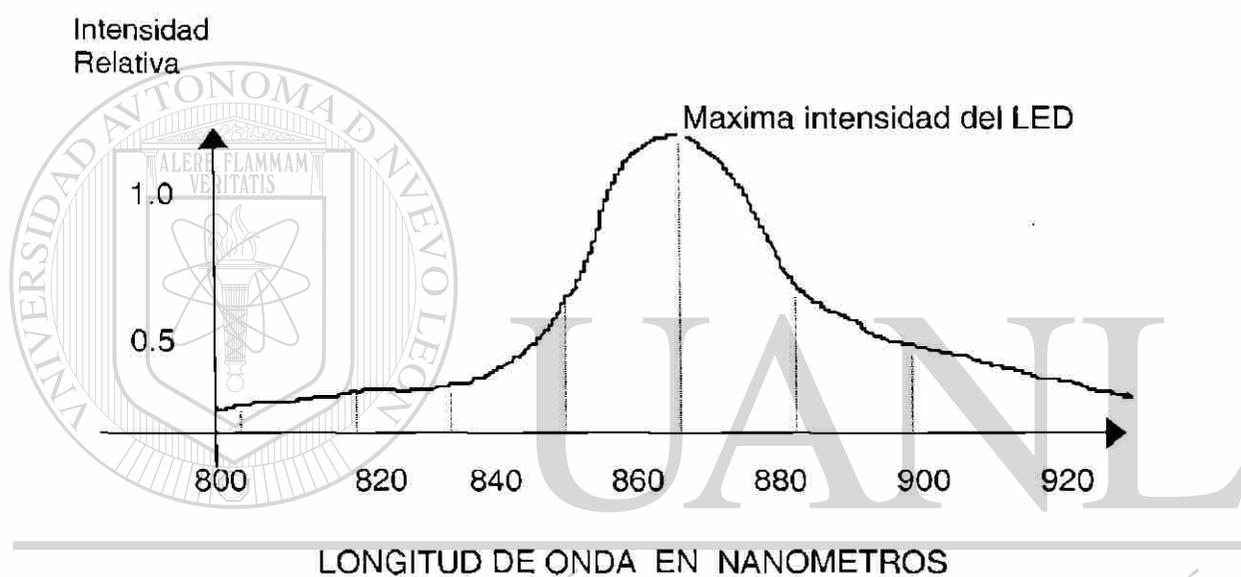


Figura 3.24 Intensidad Máxima del LED.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 3.3.1.4 Diodo laser de inyección

El principio básico para la emisión de un diodo láser es la emisión estimulada. La amplificación de la luz se produce cuando un fotón incidente estimula la emisión de un segundo fotón con una energía casi igual a la energía de separación entre los dos niveles electrónicos.

En las siguientes figuras se muestran los tipos de fotoemisores (LED's y LASER) así como la potencia que generan.

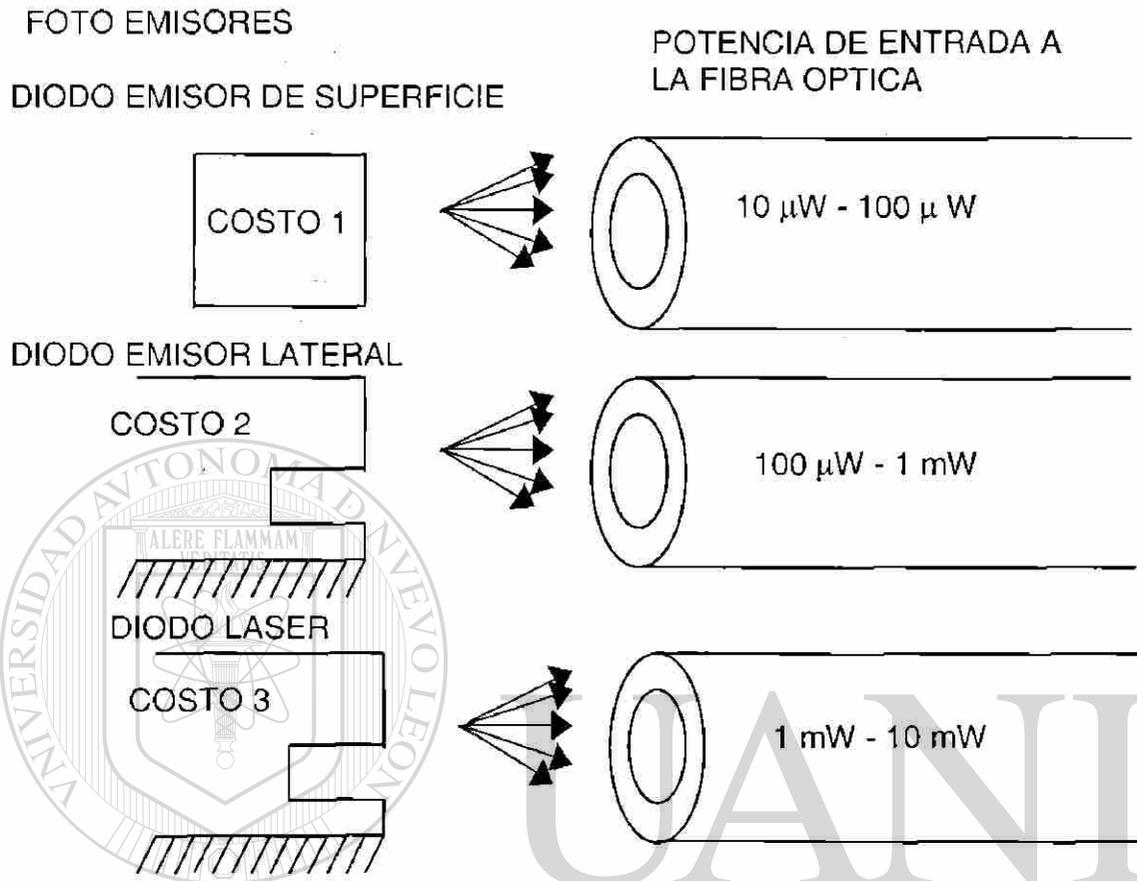


Figura 3.25 Relación de potencia emitida y costo para los distintos emisores.

### 3.3.2 Usos del laser en la fibra optica

Una definición comúnmente aceptada para el láser es la siguiente :  
 “Dispositivo que produce radiación óptica basada en una inversión de población para proporcionar luz amplificada por emisión de radiación estimulada”.

Normalmente se utiliza una cavidad óptica resonante para conseguir la real imantación positiva. La radiación láser puede ser altamente coherente, o temporalmente o espacialmente o bien ambas. También es muy importante el

concepto del “umbral láser”, que es el nivel de emisión que tiene lugar debido a una emisión estimulada y no a una emisión espontánea.

Dentro de las aplicaciones del láser la más conocida es la utilizada en la medicina. Algunos investigadores han empleado microláseres unidos a cateteres para eliminar obstrucciones en las arterias de los animales. La combinación de cámaras con fibras ópticas capaces de ser insertadas en el interior de los cateteres permiten a los investigadores médicos profundizarse en el estudio del interior del cuerpo humano.

El uso del láser dentro de sistemas de comunicación cada día va en aumento. La principal aplicación del láser dentro de los sistemas de comunicación se da en el área de transmisión y recepción de información.

Así podemos distinguir las siguientes clases:

**Clase I:** Se consideran diodos láser de clase I aquéllos que no son dañinos a partes del. Un ejemplo de este tipo de láser es el de arseniuro de galio (GaAs) cuyo espectro de emisión va desde 820 a 905 nm.

**Clase II:** Los diodos láser de la clase II son aquellos que emiten por debajo de 1 miliwatts de potencia. Estos láseres pueden producir daños en la retina cuando inciden directamente o después de alguna reflexión sobre el ojo. El equipo debe contar con una luz piloto y un obturador, así como con una etiqueta indicadora de precaución.

**Clase III:** En esta clase se distinguen dos subclases, la **clase III a** y la **clase III b**. Los diodos láser de He-Ne de menos de 4 miliwatts se incluyen en la **clase III a**. Son altamente peligrosos para los ojos, y deben incluir una etiqueta entre 4 y 50 miliwatts de potencia, y deben de ir equipados con una luz piloto, un obturador y una etiqueta indicadora de peligro.

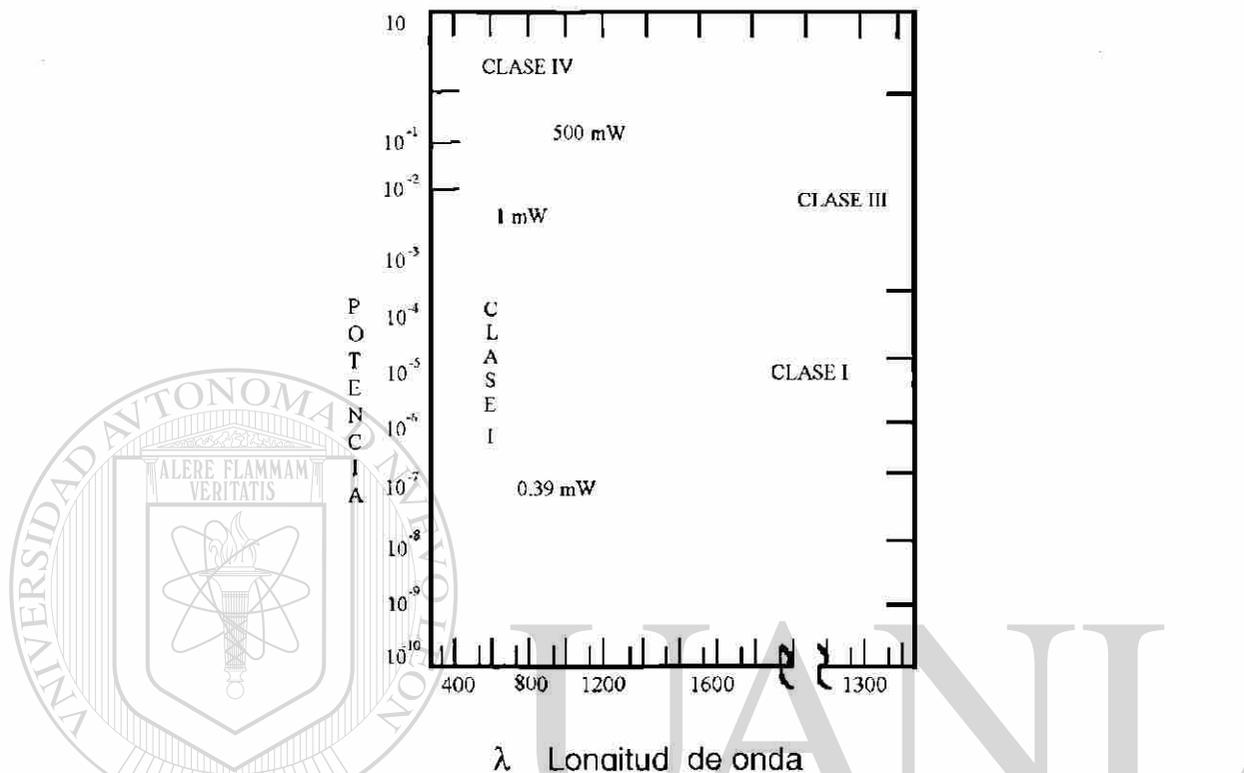


Figura 3.26 Potencia y longitud de onda de varios tipos de diodos láser.

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**Clase IV:** Los diodos láser de esta categoría son aquellos capaces de emitir grandes potencias. Dentro de este grupo podemos encontrar láseres de  $\text{CO}_2$ , Nd (Neodímio), YAG y vidrio entre otros.

Estos diodos láser son muy peligrosos para los ojos y para muchas otras áreas del cuerpo que se vean expuestas un período suficientemente largo, pudiéndose producir quemaduras en la piel. Deben llevar una etiqueta indicadora de peligro, además de un piloto y un obturador.

**Clase V:** Se trata de diodos láser de alta potencia. Es una clase reciente en la que la principal característica es que deben quedar siempre confinados, no permitiéndose la salida de ningún reflejo. Los sistemas de

seguridad deben sufrir revisiones periódicas para garantizar su buen funcionamiento. Deben de llevar una etiqueta de peligro en lugar visible, aunque los peligros para el operador son pequeños al garantizarse su confinamiento.

Muchos son los países con legislación referente a normas de seguridad para equipos láser ( Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, Francia, Suecia, Noruega, Dinamarca, Suiza, Japón, Australia, Canadá y China). En México, sin embargo, no existe una normativa específica para este tipo de aparatos en lo que atañe a los peligros por exposición a la radiación láser.

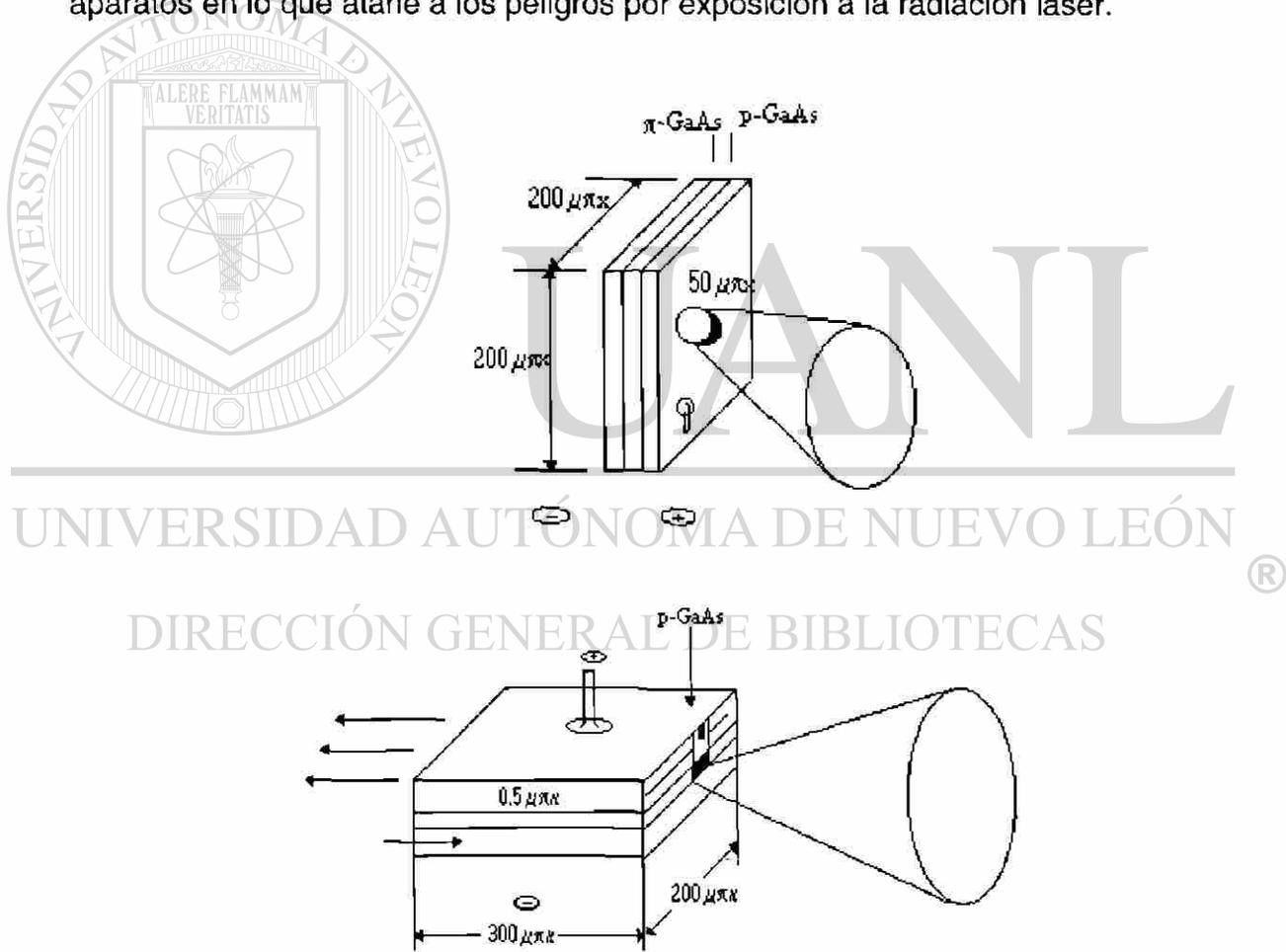


Figura 3.27 Transmisores Ópticos Láser.

### 3.3.2.1 Transmisor

La siguiente figura muestra el diagrama a cuadros de un transmisor de fibras ópticas.

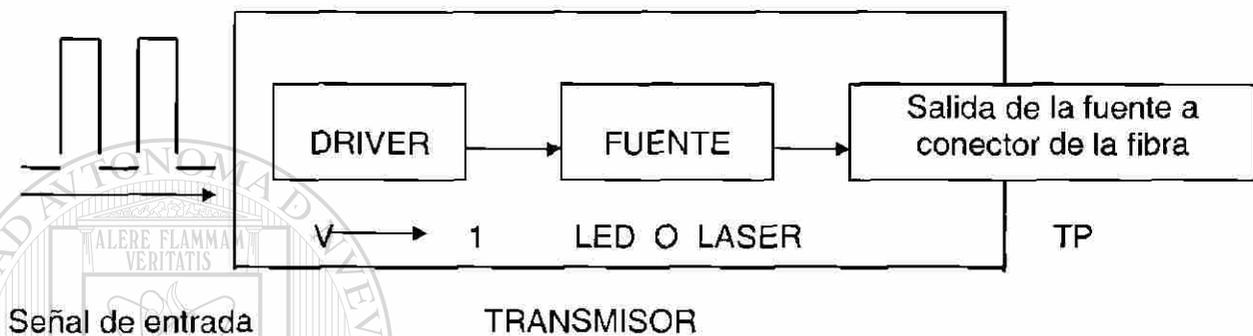


Figura 3.28 Diagrama a cuadros de un transmisor de fibra óptica.

Los dos tipos de acoplamiento de salida de los transmisores más comunes

son:

- PIGTAIL.
- ADM (Active Device Mount) o Acoplador de Dispositivo Activo

Comparación entre la potencia, tamaño de la fibra y longitud de onda de PIGTAIL y ADM

PIGTAIL		TAMAÑO DE LA FIBRA		
		100/140 $\mu\text{m}$	62.50/125 $\mu\text{m}$	50/ 125 $\mu\text{m}$
LONGITUD	830 nm	TP	- 4 DB	- 6 DB
DE ONDA	1300 nm	-10 DB	- 14 DB	-16 DB

ADM		TAMAÑO DE LA FIBRA		
		100/140 $\mu\text{m}$	62.50/125 $\mu\text{m}$	50/ 125 $\mu\text{m}$
LONGITUD	830 nm	+5.5 DB	T P	- 3.5 DB
DE ONDA	1300 nm	-5.5 DB	- 6 DB	- 9.5 DB

Tabla 3.4 Tabla comparativa entre Pigtail y ADM.

En la siguiente figura se muestra el acoplamiento mecánico de estos transmisores con la fibra óptica, también se muestra la gráfica de pérdidas espectrales en dB/km en función de la longitud de onda de la fuente emisora.

### 3.3.2.2 Acoplamiento mecánico en transmisores

En las siguientes figuras se muestran los acoplamientos mecánicos que pueden tener los transmisores.

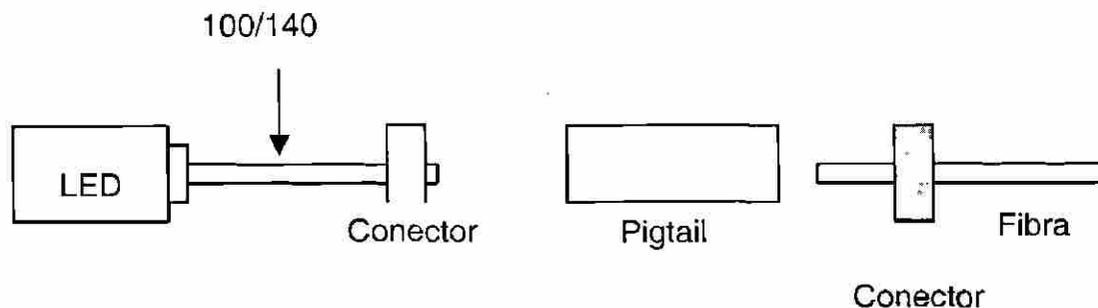


Figura 3.29 Acoplamiento del Pigtail con una fibra óptica.

### 3.3.2.3 Pigtail

Tamaño de la fibra óptica	100/ 140 $\mu\text{m}$	62.5 / 125 $\mu\text{m}$	50 / 125 $\mu\text{m}$
Potencia óptica de salida	TP	- 4 DB	- 6 DB
% de pérdidas para 100 / 140	0 %	- 60 %	- 75 %

Tabla 3.5 Relación de tamaño de núcleos de revestimiento de Pig tail.

### 3.3.2.4 Acoplador de Dispositivo Activo (ADM)

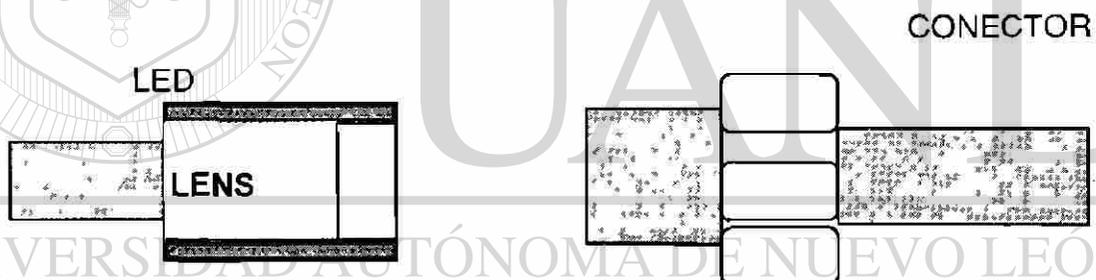


Figura 3.30 Acoplamiento de un ADM con una fibra óptica.

Tamaño de la fibra	100/ 140 $\mu\text{m}$	62.5 / 125 $\mu\text{m}$	50 / 125 $\mu\text{m}$
Potencia optica de salida	+5.5 dB	TP	-3.5 DB
% De perdidas para 100 / 140	+ 12 %	0 %	-55 %

Tabla 3.6 Tabla comparativa del ADM.

### 3.4 Fotodetectores

El detector es un componente ideal en un sistema de fibras ópticas, su función es convertir la señal óptica recibida en una señal eléctrica, la cual se amplifica antes de ser procesada.

Principio de operación de los fotodetectores.

Un fotón puede ser detectado por un proceso de interacción de la materia en el que el fotón es aniquilado y su energía transformada en calor o corriente eléctrica. Los requisitos para la ejecución y compatibilidad de detectores son muy similares a los requisitos de la fuente de emisión.

Estos requisitos son:

- Alta sensibilidad de operación.
- Alta fidelidad.
- Amplitud de respuesta eléctrica a la señal óptica recibida.
- Tiempo de respuesta corto.
- Estabilidad de las características de ejecución.
- Tamaño físico del detector.

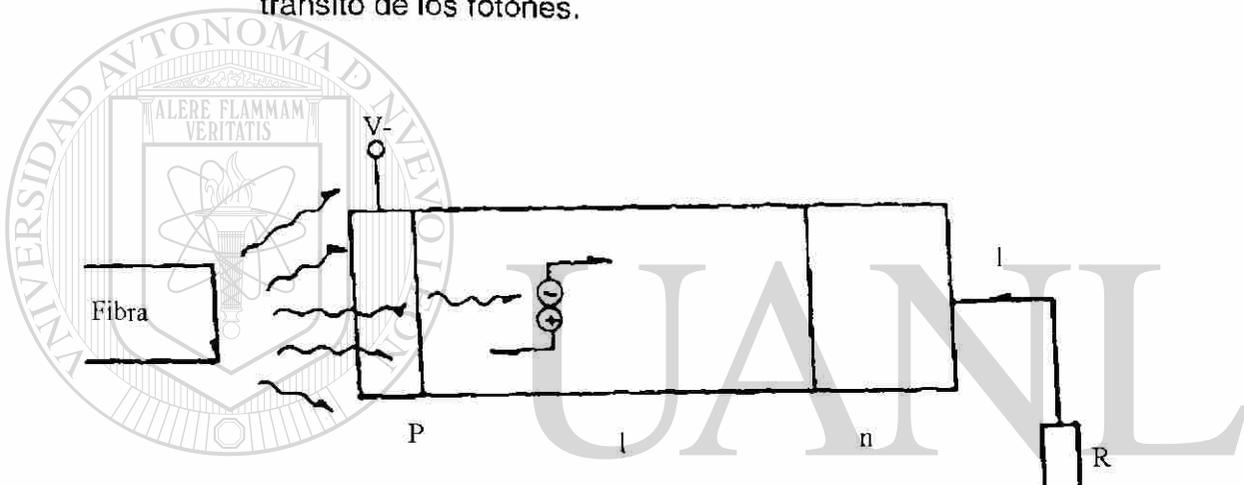
Los fotodetectores se clasifican en dos tipos:

- PIN ( Positivo Intrínseco Negativo )
- APD (Fotodiodo de Avalancha )

### 3.4.1 Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN se utiliza para permitir la operación en longitudes de onda grandes donde la luz penetra más profundamente en el material semiconductor. Tiene las siguientes características:

- Si se incrementa el ancho de la región activa se incrementa la eficiencia.
- El ancho de la región de agotamiento incrementa el tiempo de tránsito de los fotones.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

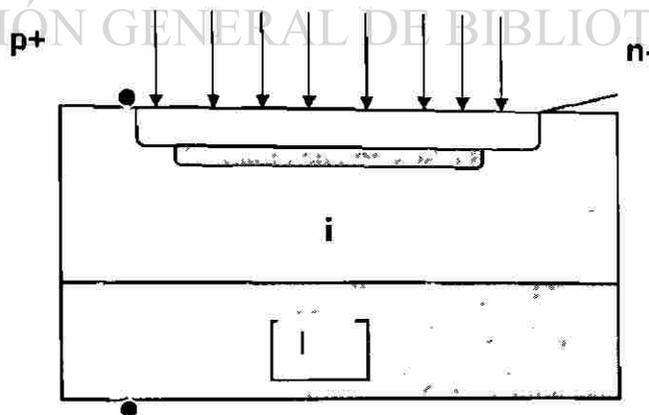


Figura 3.31 Partes del fotodiodo PIN.

### 3.4.2 Fotodiodo APD

El fotodiodo APD se polariza fuertemente, siendo el campo eléctrico de la unión lo suficientemente grande para acelerar los fotones de carga y adquirir suficiente energía para más aceleración de lo que él lograría por un proceso de ionización.

El fotodiodo APD puede tener una estructura y geometría que maximice la absorción de fotones.

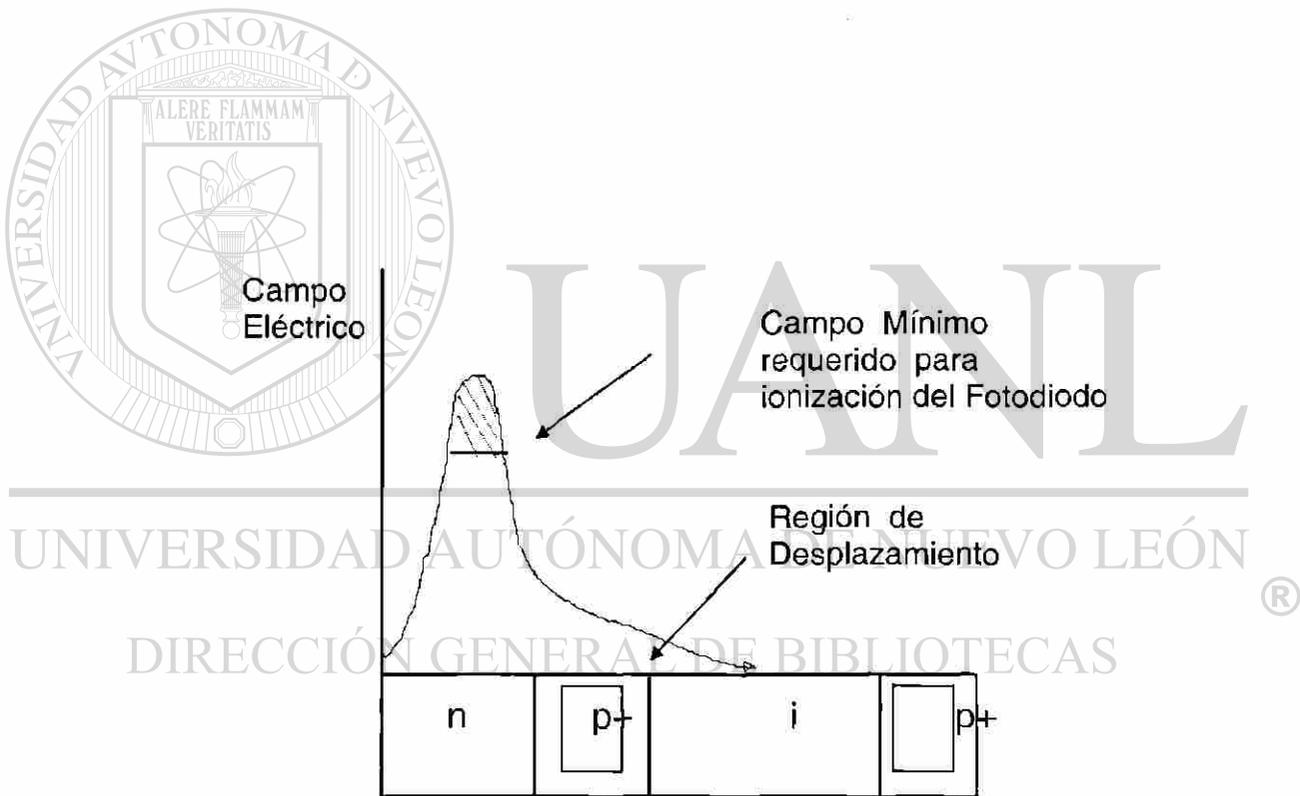


Figura 3.32 Fotodiodo de avalancha

FOTODIODO PIN	FOTODIODO APD
No tiene ganancia.	Ganancia interna.
Sensible.	Mayor sensibilidad.
Ancho de banda limpio.	Ancho de banda reducido.
Usa bajo voltaje de polarización.	Usa alto voltaje.
Bajo ruido.	Ruidoso.
Muy confiable.	
Más comunmente usado.	

Tabla 3.7 Comparación entre un PNO PIN Y un APD.

### 3.4.3 Receptor

La siguiente figura nos muestra el diagrama a cuadros un receptor de fibras ópticas.

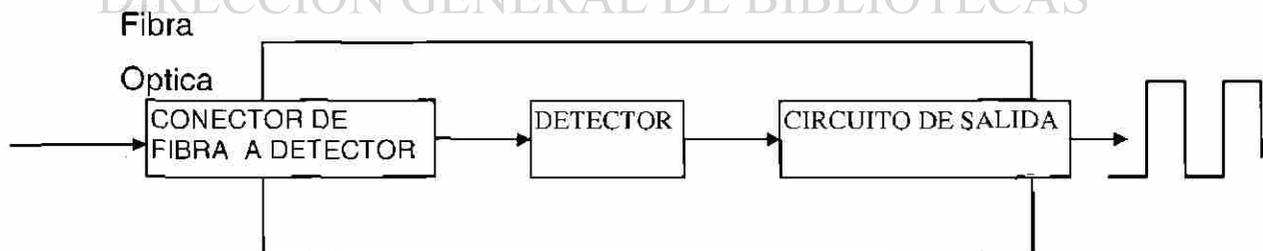


Figura 3.33 Diagrama a cuadros de un receptor de fibras ópticas.

### 3.4.4 Detectores.

Características :

- PIN

Gran durabilidad, no muy caro, para uso rudo, etc.

- APD

Bajo ruido de preamplificación, muy caro, mediana durabilidad.

- Longitud de onda.

Silicio (830 nm)

Ga As (1300 nm)

### 3.4.5 Acoplamiento mecánico en detectores

En las siguientes figuras se muestran los acoplamientos mecánicos que pueden tener los detectores.

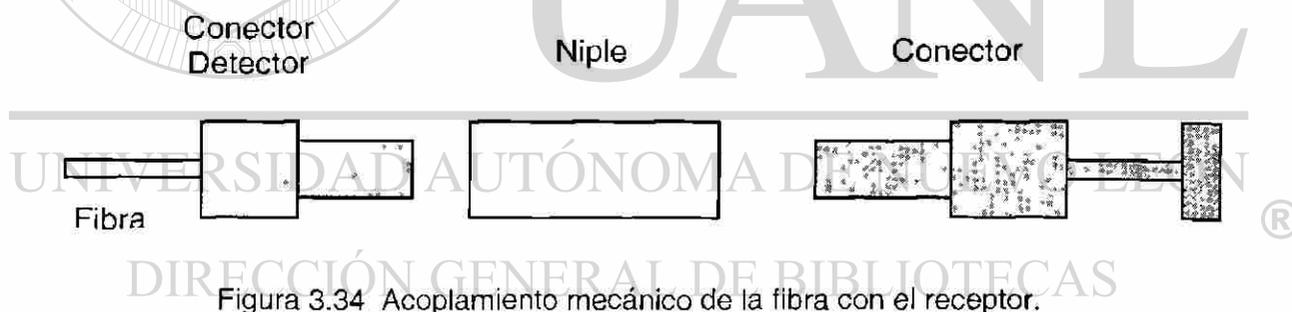


Figura 3.34 Acoplamiento mecánico de la fibra con el receptor.

Acoplador de dispositivo activo

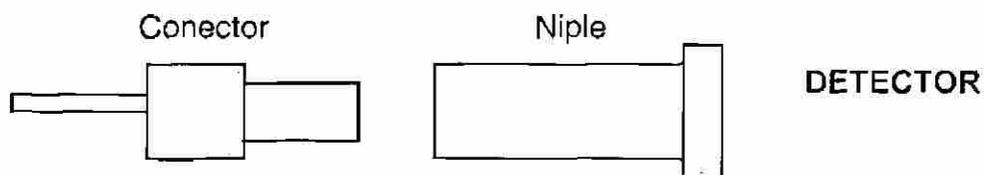


Figura 3.35 Acoplamiento de un Detector con un ADM

Características del amplificador del detector.

- Sensitividad, RS (DBM)
- Rango dinámico, RDY (DB)
- Rango de operación desde RS hasta saturación.
- Escala en dB.

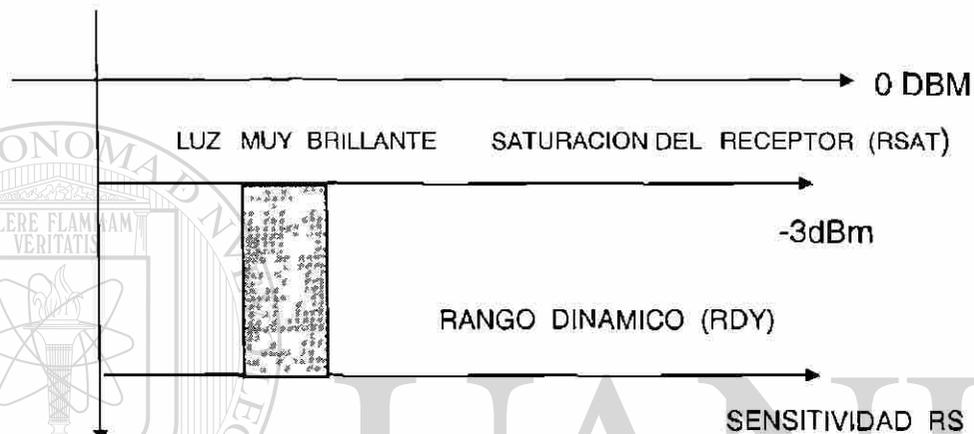


Figura 3.36 Parámetros del receptor

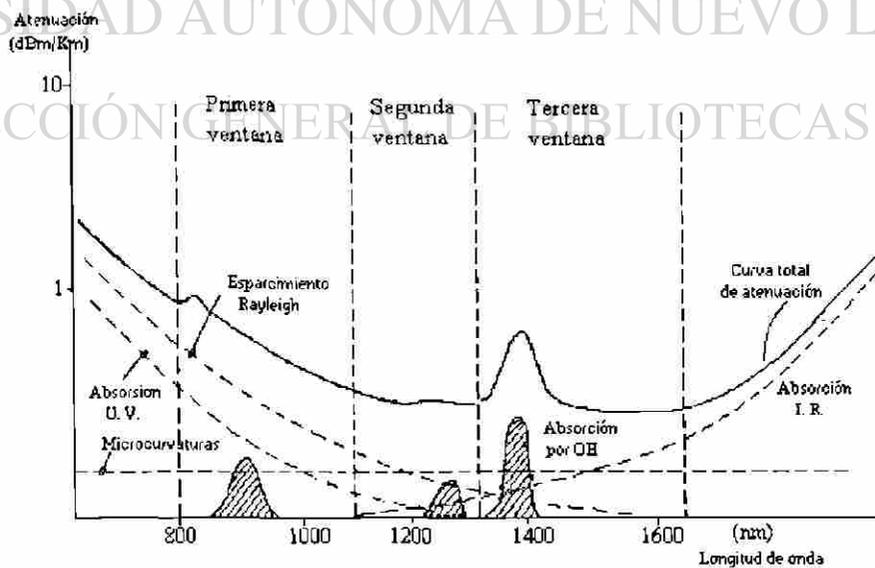


Figura 3.37 Ventanas de operación de la fibra óptica.

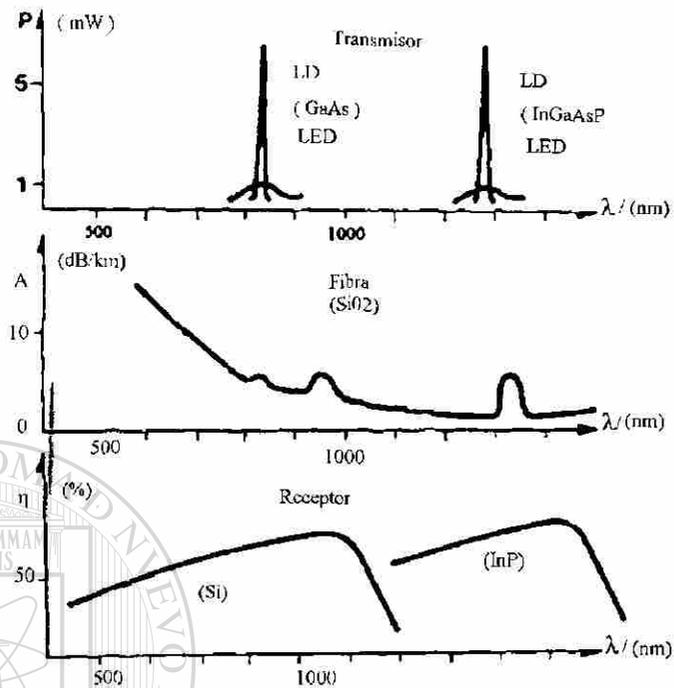


Figura 3.38 Gráfica de la longitud de onda de operación de transmisores, receptores y atenuación de fibra óptica de Silicio.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPÍTULO 4

## COMPONENTES DE INTERCONEXIÓN DE FIBRA OPTICA

### 4.1 Empalmes y conectores

La interconexión y el acoplamiento de las fibras ópticas con diferentes dispositivos tales como fuentes de luz y detectores, requieren de especial cuidado, ya que en una instalación se desea reducir al mínimo las pérdidas causadas por uniones de fibras ópticas necesarias en el sistema.

Las uniones en las fibras ópticas pueden ser fijas o temporales. En la primera unión se lleva a cabo por un empalme permanente, y en la segunda se utilizan conectores que pueden ser removibles.

El tipo de unión a elegir depende de las necesidades de la instalación.

El incremento en las pérdidas de un enlace es el factor más importante que genera cualquier unión de fibras ópticas, por lo cual, deben considerarse sus causas y la magnitud de sus efectos.

#### 4.1.1 Pérdidas extrínsecas e intrínsecas

Por las diversas causas que son provocadas, las pérdidas en las uniones con fibras ópticas pueden dividirse en extrínsecas e intrínsecas.

##### 4.1.1.1 Pérdidas extrínsecas

Las pérdidas extrínsecas son causadas por desalineamiento mecánico de la unión de las fibras ópticas.

Este desalineamiento causa pérdidas de radiación ya que el cono de aceptación de la fibra emisora, no concuerda con el cono de aceptación de la fibra receptora.

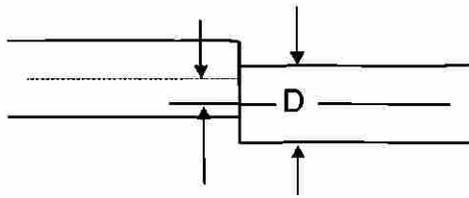
Existen tres tipos principales de desalineamiento

1. Desplazamiento o falla axial.- Ocurre donde los ejes de la fibra no están colineales sino que están separados paralelamente por una distancia determinada.

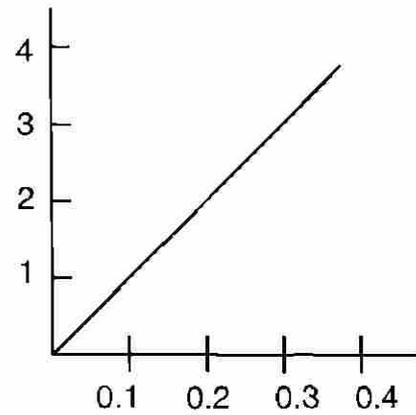
2. Desalineamiento o falla angular.- Sucede cuando los ejes de la fibra forman un ángulo y las caras de los extremos exceden de su separación máxima permitida.

3. Separación longitudinal.- Se presenta en la fibra óptica al unirse sobre un mismo eje pero tienen un espacio entre las caras de los extremos.

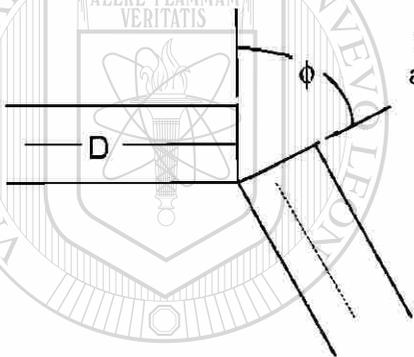
Desplazamiento o falla axial



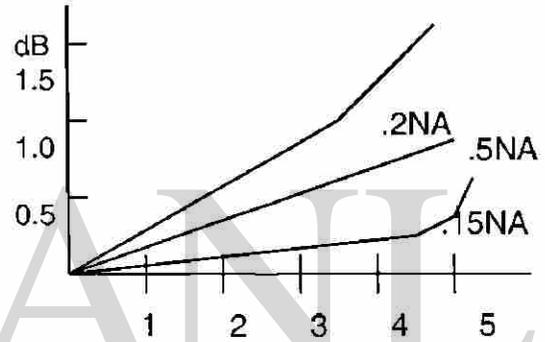
Pérdidas de desalineación lateral en dB



Desalineamiento o falla angular

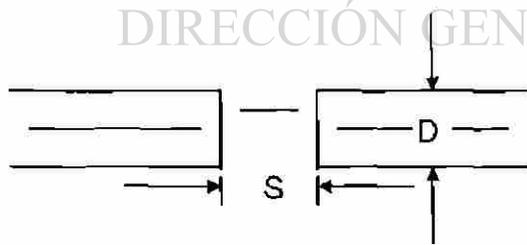


Pérdidas angulares en dB



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Separación longitudinal



Pérdidas en separación final en dB

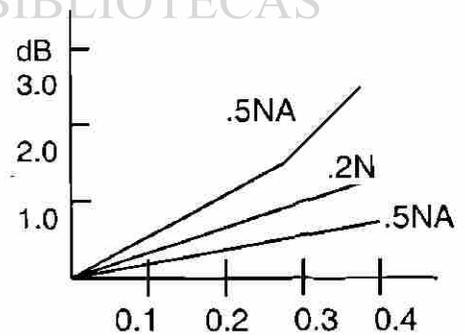


Figura 4.1 Pérdidas por Desalineamiento.

#### 4.1.1.2 Pérdidas Intrínsecas

Las pérdidas intrínsecas son ocasionadas por variaciones de la geometría de la fibra y sus características de diseño. Estas pérdidas tienen también un efecto importante en las pérdidas totales del sistema.

Los parámetros totales de variación de la geometría son:

- Diámetro de núcleo.
- Elipticidad del núcleo.
- Apertura numérica.
- Perfil del índice de refracción.
- Concentricidad del núcleo y el revestimiento.

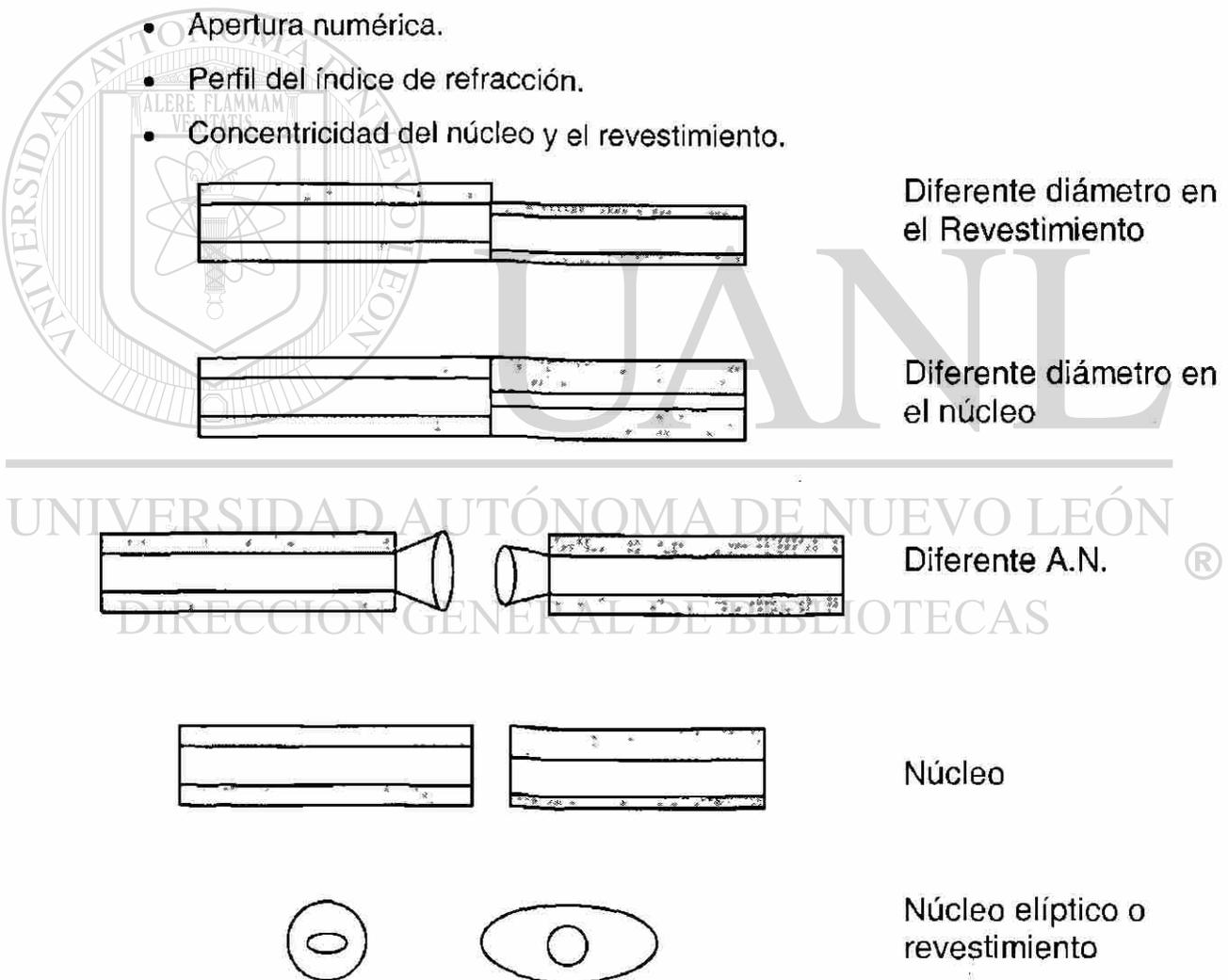


Figura 4.2 Pérdidas por fallas en la fabricación de la Fibra Óptica.

## 4.2 Empalmes

En el mundo de los conectores de cobre, el empalme puede ser una simple pareja de alambre unidos y soldados, pero los empalmes de la fibra óptica son una tarea mucho más complicada.

Capacitación especial, práctica y equipo, junto con paciencia y una buena coordinación son necesarios para hacer empalmes aceptables. Los dos métodos básicos para los empalmes son: Mecánicos y Fusión.

### 4.2.1 Empalmes mecánicos (elastoméricos)

Cuando se tienen enlaces de corta distancia donde se pueden tolerar pérdidas considerables. Se utilizan empalmes mecánicos en los cuales las fibras ópticas son unidas por medios mecánicos como ranuras en forma de varillas (Se puede agregar una sustancia epóxica para adherir las fibras y además actuar como acoplador óptico).

La siguiente figura nos muestra un empalme de este tipo:

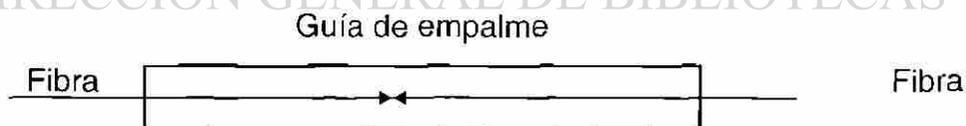


Figura 4.3 Empalme Mecánico.

Características de este tipo de empalme:

- Las fibras se manejan con herramienta manual.
- Ambas fibras se unen con una guía de empalme.
- El epóxico no es dañino.
- Kit manual.

- No muy caro.
- Trabaja con fibras multimodo.
- -2 dB de pérdidas.

#### 4.2.2 Empalme por fusión

El empalme por fusión es el método más utilizado y consiste en aplicar calor en una zona específica entre las fibras a unir, suavizándolas y fusionándolas.

Las fibras ópticas deben prepararse en los extremos para que estén planas y perpendiculares al eje limpiando la fibra de grasa y polvo.

En la siguiente figura se muestran los pasos para construir este tipo de empalme:



Figura 4.4 Empalme de Fusión.

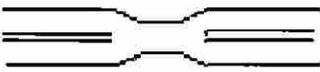
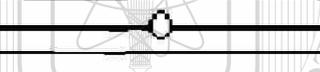
Apariencia del empalme	Causa	Remedio
 <p>Disminución</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodos sueltos, arco de fusión irregular</li> <li>2. Corriente de fusión muy alta</li> <li>3. Insuficiente acercamiento en Z</li> <li>4. Tiempo de prefusión muy largo</li> <li>5. Corriente de prefusión muy alta</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpiar electrodos</li> <li>2. Reducción de 0.2 a 0.3 mAmper</li> <li>3. Incrementar distancia <math>1 \mu\text{m}</math></li> <li>4. Estandarizar valor a 0.20 seg. , solo en casos excepcionales. Reducir 0.05 seg.</li> <li>5. Estandarizar valor a 14.5 mA cambiar solo en casos excepcionales. Reducir 0.1 mA</li> </ol>
 <p>Agrandamiento</p>	<p>Demasiado acercamiento en Z</p>	<p>Reducir <math>1 \mu\text{m}</math>.</p>
 <p>Sucio o inconcluso</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodos sucios antes del empalme</li> <li>2. Electrodos desgastados</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpiar antes de fusionar</li> <li>2. Checar la calidad de los electrodos</li> </ol>
 <p>Fusión incompleta</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corriente de Fusión muy baja</li> <li>2. Tiempo de prefusión muy corta</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumentar de 0.2 a 0.3 mA</li> <li>2. Incrementar tiempo de 0.20 seg. con pasos de 0.05 seg.</li> </ol>
 <p>Inoperante</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodos sucios, arco irregular</li> <li>2. Corriente de fusión muy alta</li> <li>3. Tiempo de prefusión muy alto</li> <li>4. Corriente de prefusión muy alta</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpiar electrodos</li> <li>2. Reducir corriente de 1 mA a 0.5</li> <li>3. Estandarizar a 0.20 seg</li> <li>4. Estandarizar a 14.5 mA</li> </ol>

Figura 4.5 Fallas en el empalme de fusión

Tabla de pérdidas para fibras, empalmes, conectores y pérdidas intrínsecas.

#### Atenuación (dB/Km)

Tamaño	830 nm	1300 nm
100/140 $\mu\text{m}$	6	3
62.5/125 $\mu\text{m}$	4	2
50/125 $\mu\text{m}$	3	1.5

Tabla 4.1 Atenuación de distintas fibras ópticas.

#### Empalmes (pérdidas)

.2 dB para empalme mecánico
.02 dB para empalme por fusión

Tabla 4.2 Pérdidas por empalmes.

#### Conectores (pérdidas)

	Max.	Min.
DB / Conector	1.5	.5

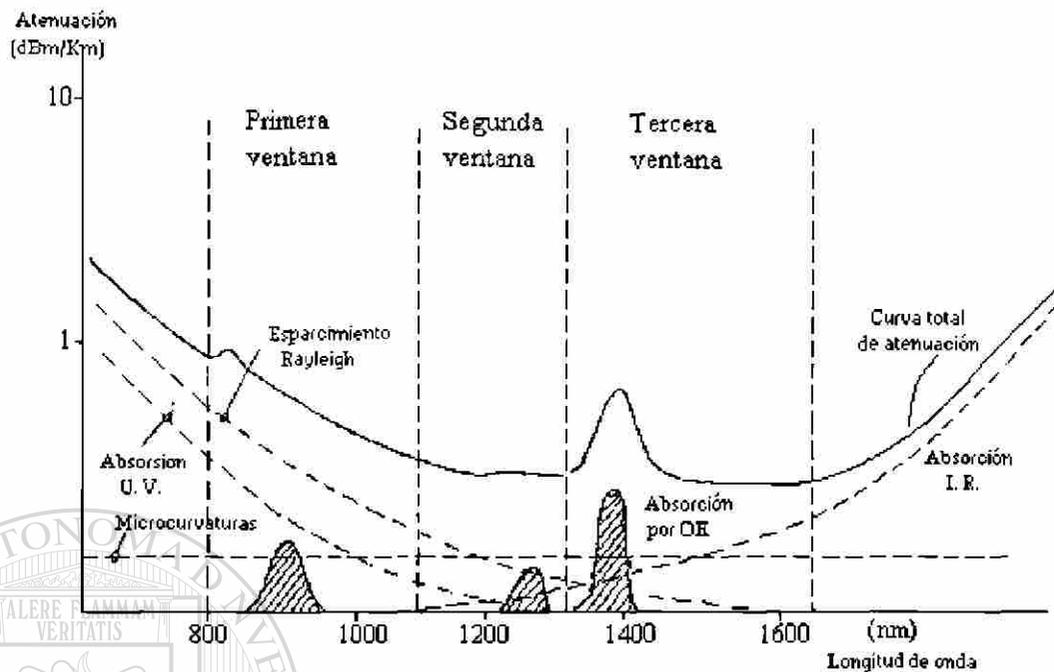
Tabla 4.3 Pérdidas por conectores.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tamaño de la fibra	100/140 $\mu\text{m}$	62.5/125 $\mu\text{m}$	50/125 $\mu\text{m}$
100/140 $\mu\text{m}$	0	-4	-6
62.5/125 $\mu\text{m}$	0	0	0
50/125 $\mu\text{m}$	0	0	0

Tabla 4.4 Pérdidas intrínsecas (DB)



Gráfica 4.1 Ventajas de operación de la fibra óptica de silicio.

### 4.3 Conectores

Cuando se requiere unir dos fibras ópticas en forma rápida y temporal se utilizan los conectores. Estos en base a sus principios de diseño se pueden dividir en dos tipos:

- De acercamiento mecánico de precisión en los extremos.
- De acercamiento óptico de las fibras a unir.

En el primer caso, se utilizan estructuras que requieren de precisión lateral, azimutal y longitudinal para lograr el alineamiento de la fibra.

En el segundo caso se utilizan lentes para ayudar en el alineamiento de las dos fibras a unir, logrando mejores tolerancias angulares.

Los conectores más utilizados son los de acercamiento mecánico y en este tipo se encuentran muchas variedades que combinan costos, pérdidas ópticas, durabilidad, etc.

#### 4.3.1 Procesos de conectorización o conexión

A continuación se dan los pasos a seguir para hacer una conectorización

- 1) Preparar la fibra.
- 2) Cortar la cubierta externa.
- 3) Cortar el buffer primario junto con el kevlar.
- 4) Poner epóxico dentro del conector.
- 5) Poner el conector hasta que tope en el buffer primario.
- 6) Calentar el conector para secar el epóxico.
- 7) Pulir la terminal del conector.

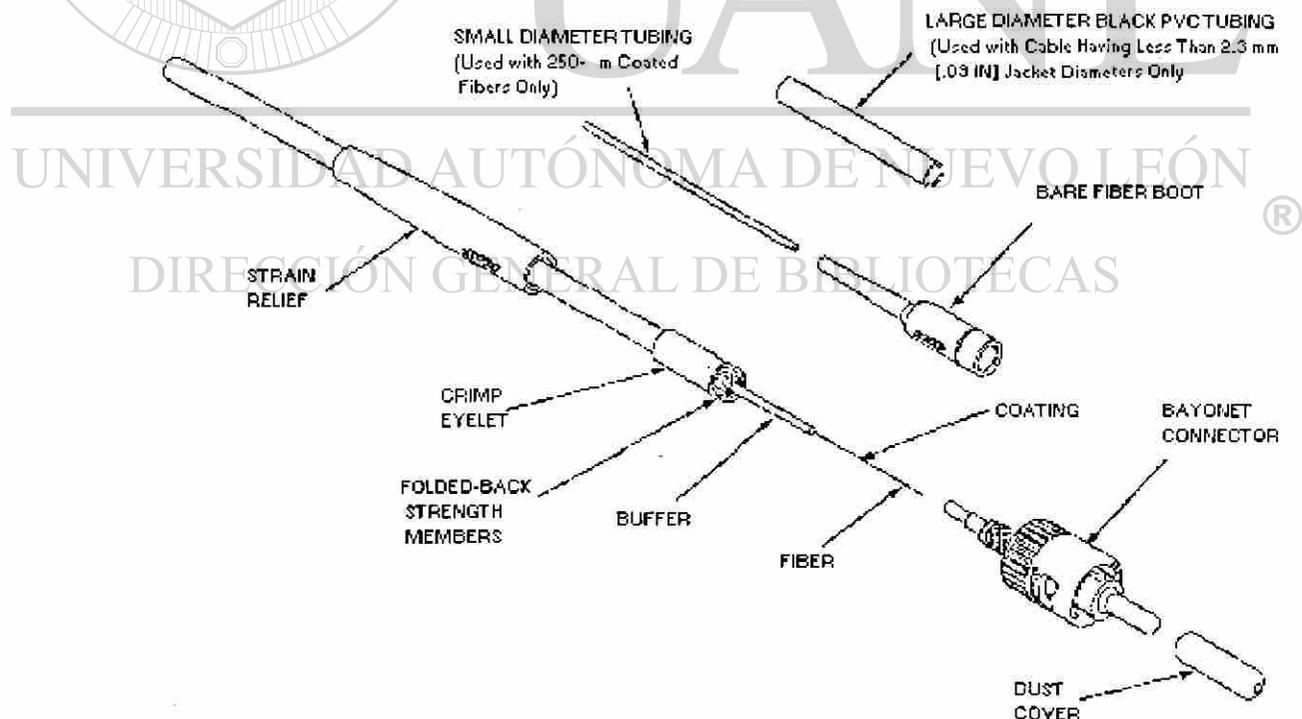


Figura 4.6 Partes de un conector.

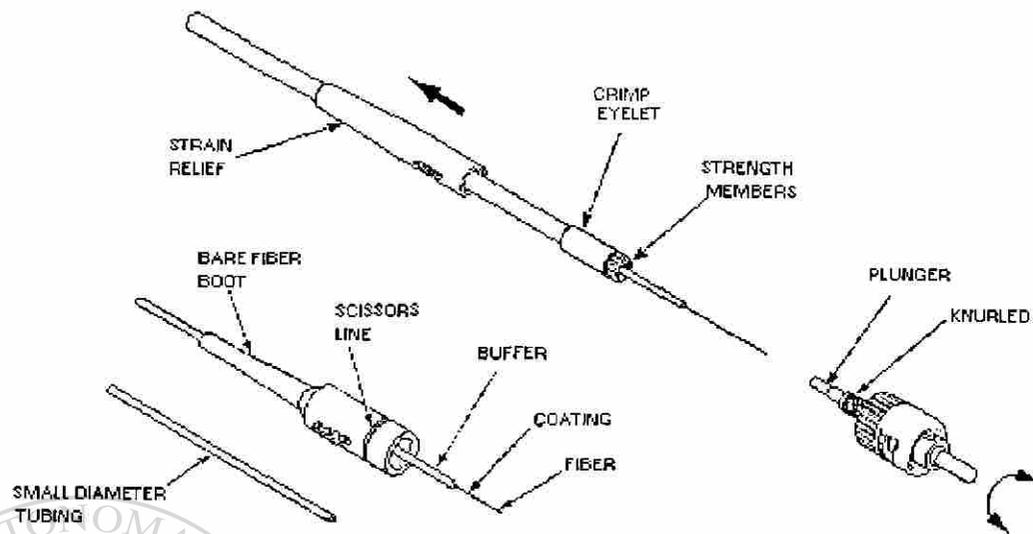
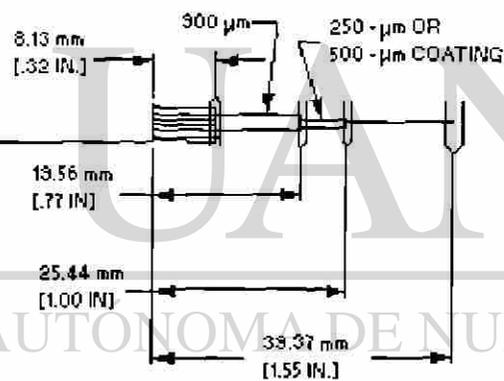
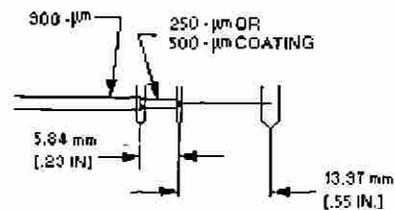


Figura 4.7 Elementos de un conector ST.



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



STRIP LENGTH TEMPLATE, 300- $\mu\text{m}$  BARE FIBER

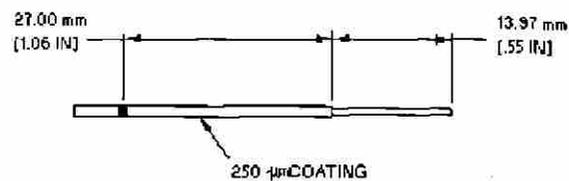


Figura 4.8 Separación máxima Permitida.

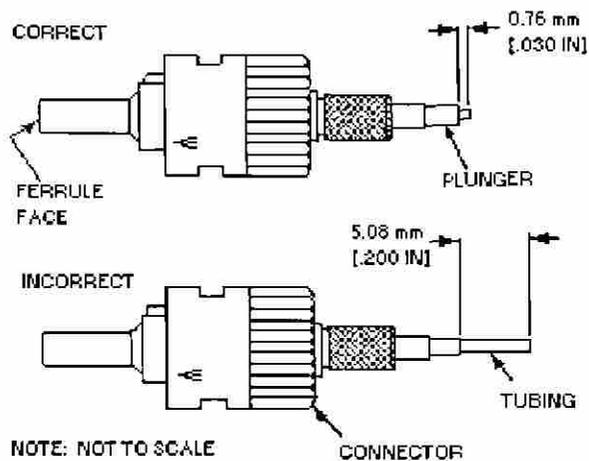


Figura 4.9 Distancias mínima y máxima de la fibra con la férula del conector.

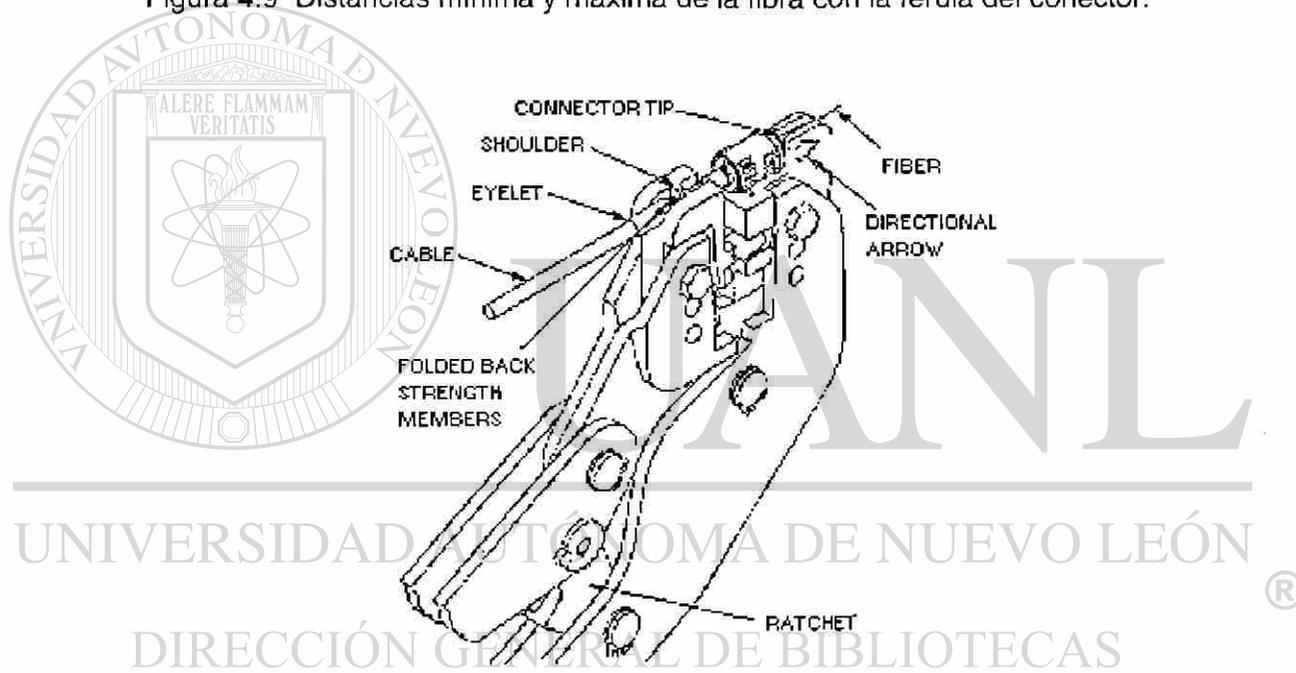


Figura 4.10 Proceso de Crimpeado.

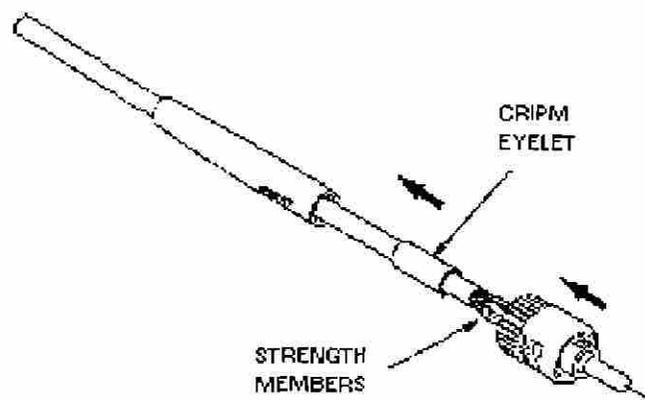


Figura 4.11 Ajuste de los miembros de fuerza.

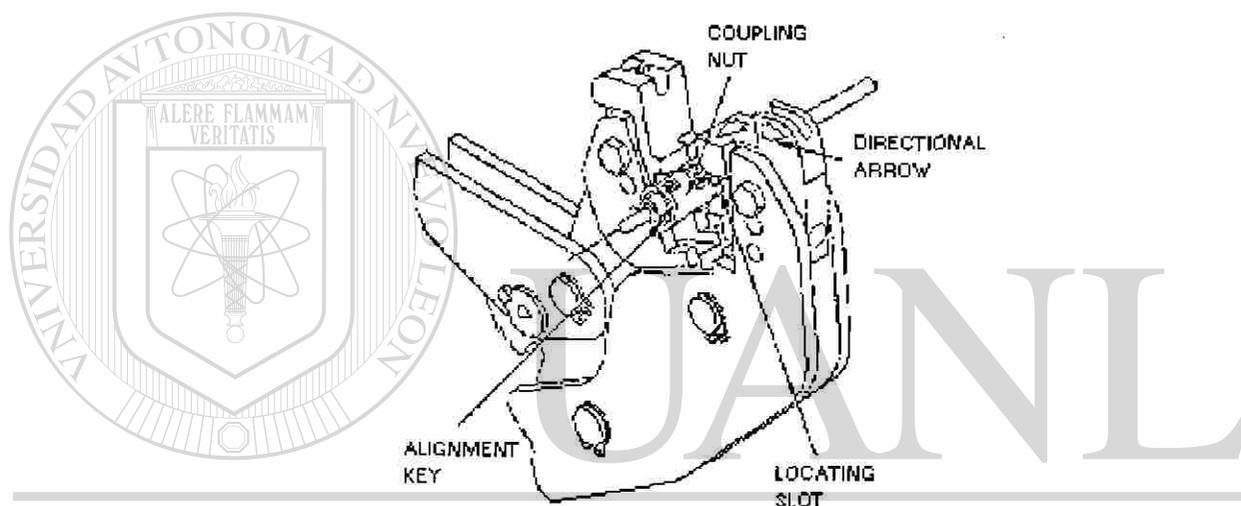


Figura 4.12 Crimpeado del casquillo del conector.

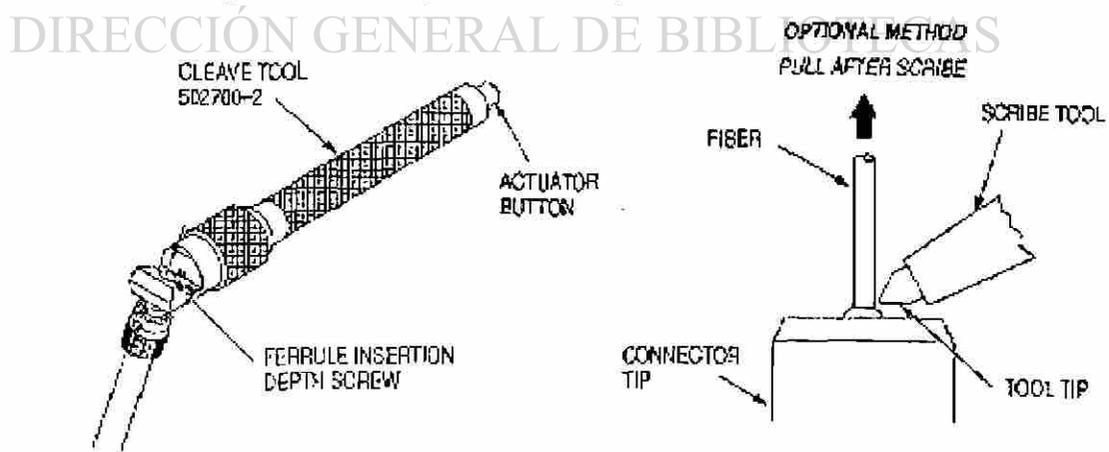


Figura 4.13 Corte de la fibra sobrante.

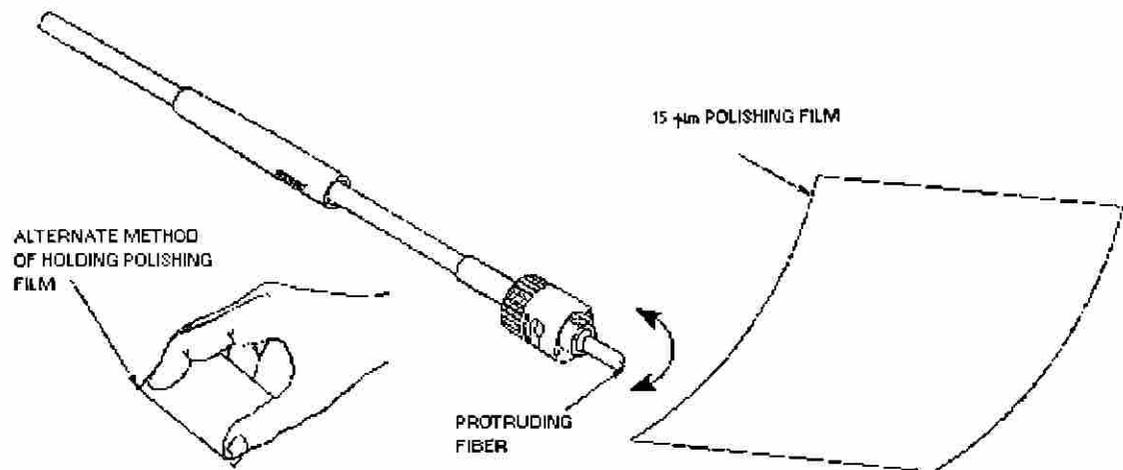


Figura 4.14 Preparación para el pulido.

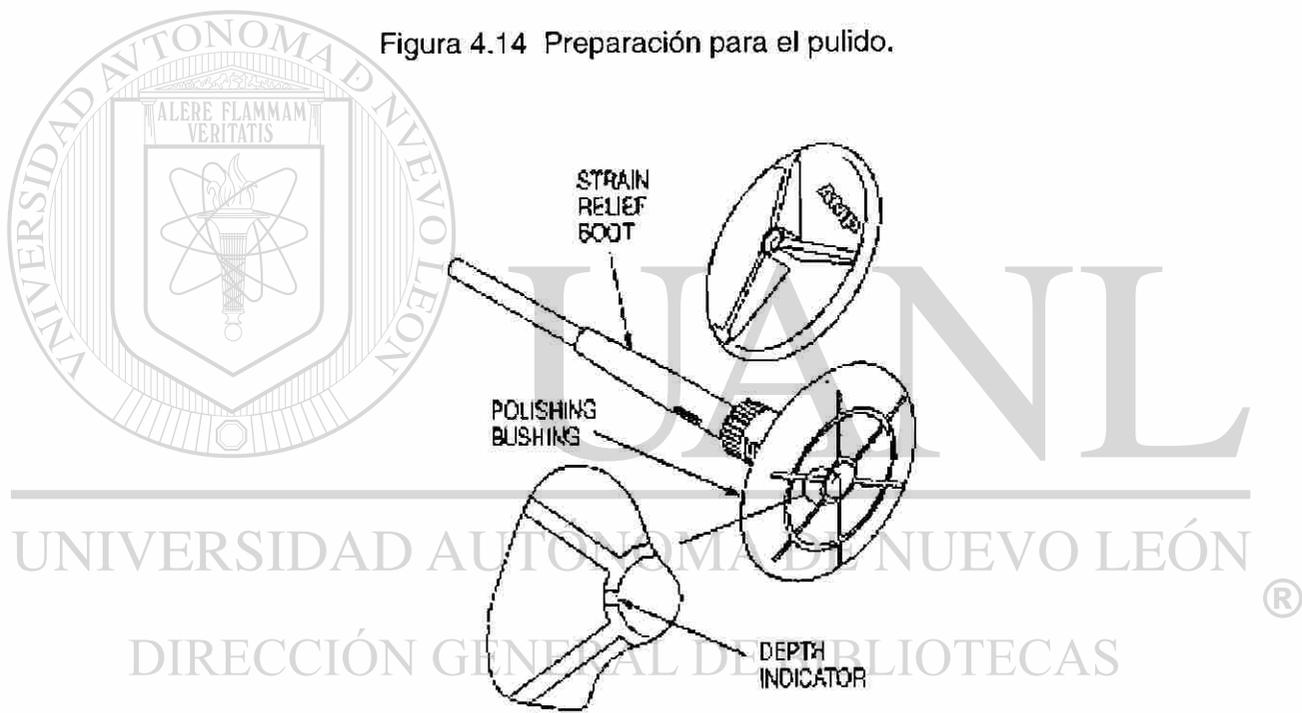


Figura 4.15 Montaje del disco pulidor.

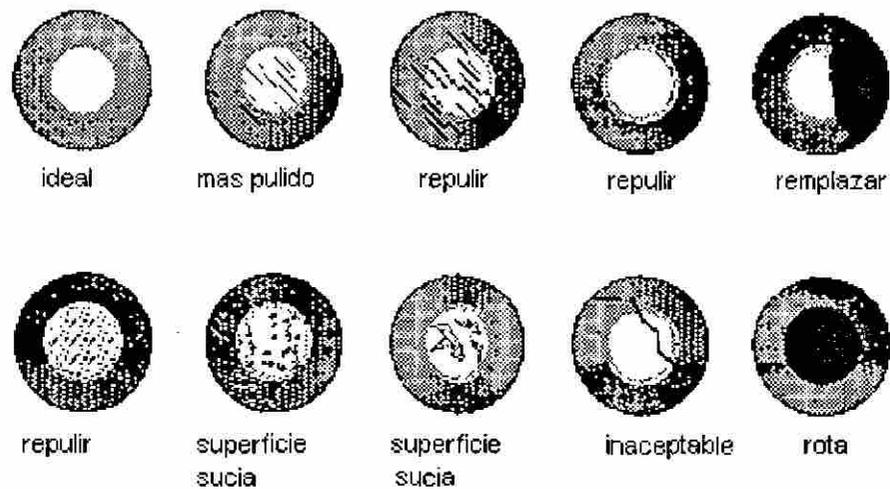


Figura 4.16 Efectos producidos por el pulidor.

#### 4.4 Tipos de fibras y cables ópticos

##### 4.4.1 Tipos de fibras ópticas

Las fibras ópticas son de dos tipos, monomodo y multimodo dependiendo de la forma de propagación que presenten.

- Monomodo

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las fibras de tipo monomodo tienen un solo modo de propagación que permite que la luz viaje a todo lo largo del núcleo, evitando la dispersión modal.



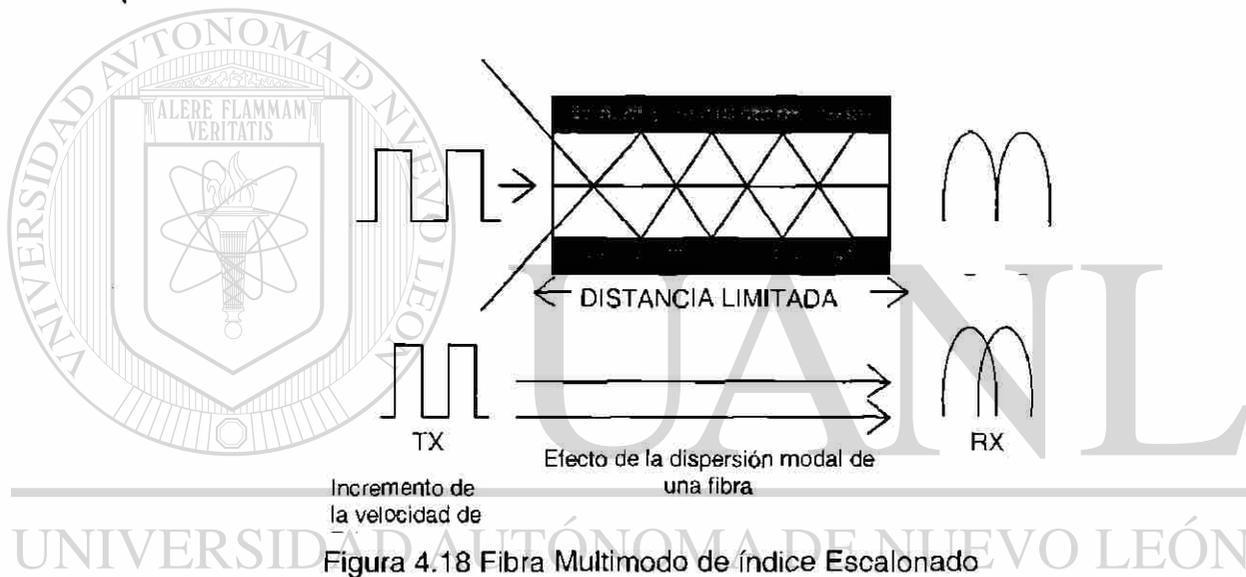
Figura 4.17 Fibra Monomodo

- Multimodo

Las fibras de todo tipo multimodo pueden ser fibras de índice escalonado y fibras de índice gradual. A continuación explicaremos cada una.

#### 4.4.2 Fibras de índice escalonado

El núcleo de estas fibras están constituidas de un índice de refracción constante, rodeado por un revestimiento. El índice de revestimiento siempre es menor que el del núcleo con el que hace frontera; en este caso si ocurre dispersión modal donde  $A$  es el radio del núcleo.



## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 4.4.2.1 Dispersión Modal

La dispersión modal en una fibra óptica es una característica despreciable, la cual, esta en función del diámetro del núcleo, frecuencia y la longitud de la fibra óptica. La dispersión modal es una característica despreciable en las fibras ópticas.

#### 4.4.2 Dispersión Cromática

La principal limitación a la capacidad de transmisión de información de una fibra monomodo es la dispersión cromática. En otras palabras quiere decir que es el retardo en tiempo que experimenta el haz de luz a través de la fibra óptica monomodo. Las componentes monocromáticas de un pulso luminoso viajan a distinta velocidad por la fibra por lo que el pulso llega distorsionado. Este efecto se minimiza en el vidrio de sílice para las longitudes de onda de 1310 nm. Modificando la composición química del vidrio, puede conseguirse que las longitudes de ondas de mínima dispersión y de mínima atenuación coincidan en 1550 nm.

#### 4.4.3 Fibras de índice gradual

En esta fibra el índice de refracción del núcleo va decreciendo gradualmente en función del radio, hasta llegar al revestimiento.

Debido a que el índice de refracción del núcleo decrece, los rayos de la luz se van flexionando gradualmente regresando al centro del núcleo como se observa en la figura 4.19 donde **A** es el radio del núcleo.

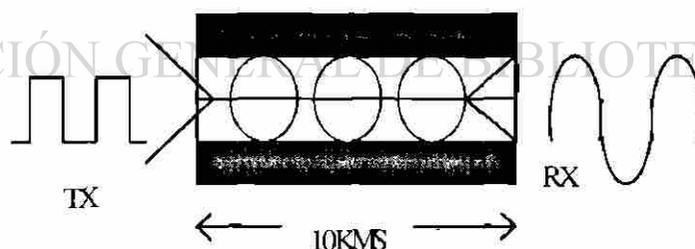


Figura 4.19 Fibra Multimodo de Índice Gradual

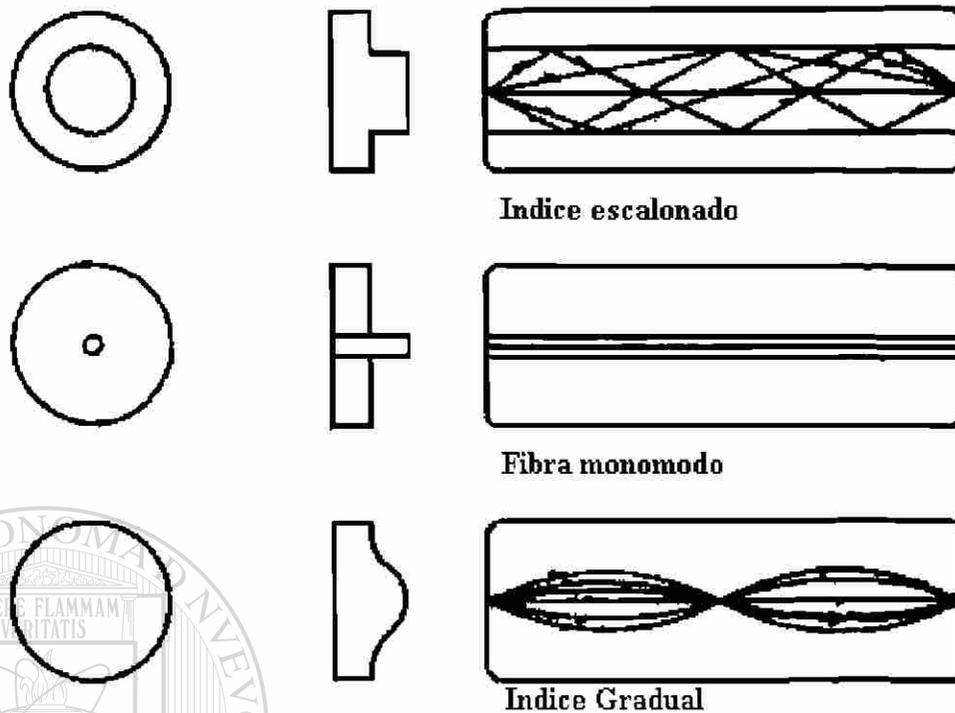


Figura 4.20 Tipos de Fibras ópticas

#### 4.4.4 Capacidad de transmisión

La capacidad de transmisión de información de distintos sistemas la vemos en la siguiente tabla.

TIPO DE CABLE	CAPACIDAD DE TRANSMISION DE INFORMACION	CONVERSIONES TELEFONICAS
Par sencillo	1 MHz-km	300
Coaxial	100 Mhz-km	30,000
Fibra óptica	100 GHz-km	30,000,000

Tabla 4.5 Capacidad de Transmisión de distintos Medios de Comunicación.

#### 4.4.4.1 Dimensiones

La siguiente figura nos muestra una fibra sencilla con y sin buffer apretado, así como una tabla donde se muestran los distintos tamaños, apertura numérica, anchos de banda y pérdidas.

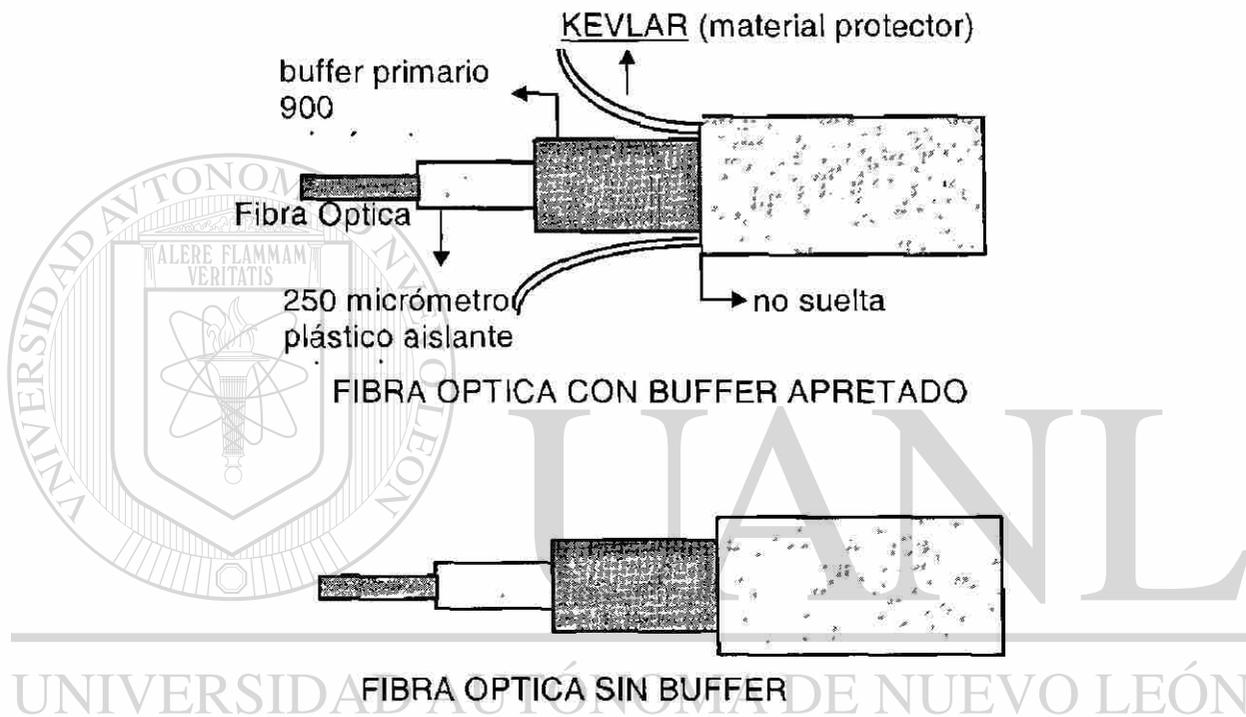


Figura 4.21 Fibra óptica con buffer y sin buffer apretado.

TAMAÑO (Núcleo/Revestimiento) DIAMETRO	NA	ATENUACION (dB/Km.)		ANCHO DE BANDA MHZ-KM	
		830 nm	1300 nm	830 nm	1300 nm
Multimodo 100/140 $\mu\text{m}$	.29	6	3	100-400	100-400
Multimodo 62.5/125 $\mu\text{m}$	.275	4	2	150-600	200-600
Multimodo 50/125 $\mu\text{m}$	.20	3	1.5	100-800	400-1500
Monomodo 10/125 $\mu\text{m}$	.19	.5	.5	100-1200	400-3000

Tabla 4.6 Relación entre tamaño, atenuación y ancho de banda de distintas fibras ópticas.

# CAPÍTULO 5

## SENSORES CON FIBRA OPTICA

### 5.1 Introducción

La investigación sobre sensores con fibras ópticas se ha desarrollado bastante desde la década de los 80's. En la actualidad ya existen muchas compañías que comercializan la tecnología a tal punto que no es difícil encontrar productos para muchas aplicaciones.

Los actuales sensores con fibra presentan una serie de ventajas que los hace competitivos con los sensores tradicionales, por citar algunas:

- a) Seguridad: No existen materiales conductores que provoquen cortos o induzcan voltajes.
- b) Tamaño pequeño y poco peso: útil en aplicaciones de vuelo (giróscopos) o lugares donde la instalación sea costosa.
- c) Inmunidad a la radiación electromagnética y emisión de radio frecuencia.
- d) Velocidad de respuesta: útil en aplicaciones de gran precisión. ( $< 1 \mu s$ )
- e) El sensor puede ser muy pequeño: Por ejemplo en aplicaciones médicas (fibroscopio).

- f) **Multiplexeo:** La fibra permite varios tipos de multiplexeo, por ejemplo multiplexión por longitud de onda (WDM), multiplexión por tiempo (TDM), etc.

Algunas de las desventajas de los sensores con fibra son:

- a) **Fragilidad:** Se requiere de muchos cuidados en el encapsulado del sensor.
- b) Los emisores y receptores pueden presentar dificultades de alineación y una vez instalados se pueden desalinearse con vibraciones o golpes.
- c) **Sensibles a varios factores al mismo tiempo:** Por ejemplo presión y temperatura.
- d) El ancho de banda espectral de los emisores está muy limitado al infrarrojo.
- e) **Costo:** Algunos componentes pueden alcanzar precios altos.

Este capítulo discute los principios básicos y las aplicaciones de los sensores basados en fibras ópticas.

En la primera sección se explican algunos fenómenos físicos importantes que intervienen en el proceso de medición. También se analizan los tipos de sensores que existen actualmente, tanto por aplicación como por principio de funcionamiento.

Se hace particular énfasis en los sensores interferométricos. Se tratan las configuraciones más importantes de estos sensores así como sus ventajas y desventajas.

## 5.2 Fenómenos físicos que intervienen en sensores

### 5.2.1 Birrefringencia

Uno de los parámetros más importantes que caracterizan a una fibra óptica es el índice de refracción del núcleo ( $n$ ).

La birrefringencia se presenta cuando el índice de refracción no es constante dentro de la fibra, es decir, cuando se tiene una sustancia ópticamente anisotrópica, de hecho todas las fibras presentan birrefringencia por más control de calidad que se tenga. Muchos sensores de fibras están basados en este fenómeno e incluso se fabrican fibras especiales con birrefringencias.

La birrefringencia puede ser intrínseca o inducida. La intrínseca se origina en el proceso de fabricación (secciones elípticas, excentricidad del revestimiento, etc). La birrefringencia inducida se puede crear por deformaciones o curvaturas de la fibra.

---

### 5.2.2 Estado de Polarización

La luz se puede visualizar como una onda electromagnética transversal. La forma más simple de transmisión es cuando se habla de luz polarizada linealmente o luz polarizada en un plano, es decir, cuando la orientación del vector de campo eléctrico constante pese a que su magnitud y signo varían con el tiempo.

Ahora supongamos que tenemos dos ondas de luz armónicas, linealmente polarizadas de la misma frecuencia, moviéndose en la misma dirección. Tenemos dos posibilidades para conocer el resultado; a) Si las direcciones de los vectores de campo eléctrico son paralelas, entonces éstos simplemente se

suman produciendo el fenómeno de interferencia. b) Si las direcciones son perpendiculares entre sí, la resultante puede ser linealmente polarizada a 0. Aquí se puede hablar del fenómeno de polarización.

Representando estas dos ondas de luz perpendiculares se tiene:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(Kz - \omega t) \hat{i} \quad E_y(z, t) = E_{0y} \cos(Kz - \omega t + \phi) \hat{j}$$

donde  $\phi$  es la diferencia de fase entre las dos ondas viajando en dirección z. La resultante es simplemente:

$$E(z, t) = E_{0x} \cos(Kz - \omega t) \hat{i} + E_{0y} \cos(Kz - \omega t + \phi) \hat{j}$$

### 5.2.2.1 Polarización lineal

Cuando  $\phi = 0$  o un entero múltiplo de  $2\pi$ , las ondas están en fase. Para este caso:

$$E(z, t) = [E_{0x} \hat{i} + E_{0y} \hat{j}] \cos(Kz - \omega t)$$

La onda resultante tiene una amplitud constante y genera un plano de vibración constante.

### 5.2.2.2 Polarización Circular

Ocurre cuando las amplitudes de las ondas son iguales y están desfasadas por  $\phi = \pi/2 \pm 2m\pi$  donde  $m=0,1,2,\dots$ . Por lo tanto:

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(Kz - \omega t) \hat{i} \quad E_y(z, t) = E_0 \cos(Kz - \omega t) \hat{j}$$

Así:

$$E(z, t) = E_0 [ \cos(Kz - \omega t) \hat{i} + \cos(Kz - \omega t) \hat{j} ]$$

### 5.2.2.3 Polarización Elíptica

La polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica. Partiremos de las ecuaciones originales para eliminar la dependencia del tiempo:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(Kz - \omega t) \hat{i} \quad E_y(z, t) = E_{0y} \cos(Kz - \omega t + \epsilon) \hat{j}$$

Se obtiene:

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right) \cos \epsilon = \sin^2 \epsilon$$

Esta es la ecuación de una elipse que hace un ángulo  $\beta$  con el eje x, tal que:

$$\tan 2\beta = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \epsilon}{(E_{0x})^2 - (E_{0y})^2}$$

Para el caso que  $\epsilon = \pi/2$  se tiene la forma más familiar de la ecuación de elipse:

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 = 1$$

Para ciertos casos especiales esta ecuación se reduce a la ecuación de la circunferencia o una línea recta.

La polarización de la luz es importante en sensores porque es uno de los parámetros que se pueden modificar al hacer las mediciones. Por ejemplo, cuando una luz polarizada atraviesa un medio birrefringente, el estado de polarización cambia. La medición de este cambio es un camino útil para sensar diferentes efectos.

### 5.2.3 Efecto electro-óptico

El índice de refracción de ciertos cristales (por ejemplo  $\text{LiNbO}_3$ ) cambia cuando se les hace pasar un campo eléctrico con alguna polarización y una dirección especial. Este efecto se llama efecto electro-óptico y se utiliza ampliamente para construir moduladores ópticos.

Existen dos contribuciones que determinaron el efecto electro-óptico, una lineal (efecto Pockel) y una cuadrática (efecto Kerr). Kaminov desarrolló una ecuación que describe el efecto:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \alpha_{ij} E + \beta_{ij} E^2$$

Donde  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  son coeficientes del efecto lineal y cuadrático respectivamente. Los subíndices indican que las constantes cambian dependiendo de la orientación. Por lo que  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  son tensores.

El efecto Pockel es más útil para transmisión en fibras ópticas y se usa para medir voltajes. Con  $\beta_{ij} = 0$  y orientando el eje del cristal con el campo eléctrico (el tensor se convierte en una constante) se obtiene una ecuación más sencilla para el efecto lineal:

$$n - n_0 = \frac{1}{2} \alpha n_0^3 E$$

Donde  $n_0$  es el índice de refracción antes de que el campo eléctrico fuera aplicado.

El efecto Kerr se usa generalmente para construir switches ópticos. Manipulando la ecuación de kaminov se puede encontrar fácilmente una expresión más sencilla:

$$\Delta n = n - n_0 = K\lambda E^2$$

El material más usado es el nitrobenzeno líquido que tiene una K de 24  $\text{pm}^2/\text{V}^2$  a 20° C. El agua tiene una K de 5.2  $\text{pm}^2/\text{V}^2$  a 20° C.

#### 5.2.4 Efecto fotoelástico

Es la variación del índice de refracción en un cristal con la aplicación de un esfuerzo perpendicular a la dirección de propagación de la luz. En materiales anisotrópicos el efecto resulta en birrefringencia del cristal.

Si el esfuerzo mecánico es producido por una onda acústica, se habla de efecto acústico óptico.

$$\Delta n = \frac{n^3 p}{2} \sqrt{\frac{2I_{acústica}}{\rho v_s^3}}$$

Donde  $p$  es la constante fotoelástica.

$v_s$  es la velocidad del sonido en el material

$I_{acústica}$  es la intensidad de la presión acústica

Este efecto se usa en sensores de presión y esfuerzos.

Tabla 5.1 Constantes fotoelásticas para algunos materiales

Material	Densidad $\rho$ (g / cm <sup>3</sup> )	Velocidad acústica $V_s$ (Km / s)	Índice de refracción N	Constante fotoelástica $\rho$
H <sub>2</sub> O (agua)	1	1.5	1.33	0.31
SiO <sub>2</sub> (cuarzo)	2.2	6	1.46	0.21
LiNbO <sub>3</sub>	4.7	7.4	2.25	0.15
PbMO <sub>4</sub>	6.95	3.74	2.30	0.28
TeO <sub>2</sub>	6	0.62	2.35	0.09

### 5.2.5 Efecto magneto-óptico

El efecto magneto-óptico se genera con otro fenómeno conocido como efecto Faraday. Cuando un rayo de luz polarizada plana atraviesa a través de una sustancia sujeta a un campo magnético, el plano de polarización cambia un ángulo  $\theta$ .

$$\theta = VBL$$

Donde:

V= constante de Verdet

B= flujo magnético paralelo a la dirección de la propagación

L= longitud del material

Algunos valores de la constante de Verdet se muestran en la tabla 5.2. Un efecto de interés es que la rotación no depende de la dirección de propagación de tal forma que el efecto puede ser duplicado, retornando el rayo por el material utilizado.

Tabla 5.2 Constante de Verdet para algunos materiales

Material	V radianes/mTa $\lambda=0.698 \mu\text{m}$
Cuarzo	4
Sulfuro de Zinc	82
Vidrio Grown	6.4
Vidrio Flint	23
Cloruro de Sodio	9.6

Este efecto es particularmente útil para hacer sensores de alto voltaje y corriente. Aquí la fibra presenta la característica de que no es conductora, lo que hace tan atractiva para estas aplicaciones.

### 5.3 Clasificación de los sensores

Los sensores se clasifican en base al mecanismo por el cual la luz se modula para transmitir la información. En general, los sensores se pueden clasificar por las siguientes categorías:

- a) Modulados por intensidad. Tipo I (Intensidad)
- b) Modulados por cambio de fase o interferométricos. Tipo A (ángulo de fase)
- c) Modulados por frecuencia. Tipo F (Frecuencia)
- d) Modulados por longitud de onda. Tipo W (Wavelength)
- e) Modulados por polarización. Tipo P (Polarización)

Cada tipo de sensor mencionado puede clasificarse en:

- a) Extrínsecos (cuando la modulación se hace actuando directamente sobre la fibra)

- b) **Intrínsecos** (cuando la modulación se efectúa sobre un transductor óptico que se aplica a la fibra)

### 5.3.1 Modulación por intensidad: Tipo I

El sensor Tipo I es el más fácil de construir. Los agentes externos afectan directamente la intensidad de la luz y se mide el cambio, entonces se relacionan con mediciones de presión o temperatura etc.

A continuación se mencionan los mecanismos más usados en las técnicas de modulación por intensidad:



Atenuación, Absorción, Dispersión  
 Reflectancia directa  
 Dispersión de Rayleigh y Raman  
 Cambios espectrales  
 Dispersión modal de Speckle  
 Filtrado de señales con carrier

Típicamente se usan las fibras multimodo (25 a 500  $\mu\text{m}$  de núcleo) para construir estos sensores.

Cuando los cambios en la intensidad se producen directamente en la fibra (p.ej. ondas acústicas, aplicación de calor, etc.) se habla de sensores intrínsecos. Por el contrario cuando los cambios se producen en algún material y la fibra sólo se utiliza para soportar la luz se tienen sensores extrínsecos.

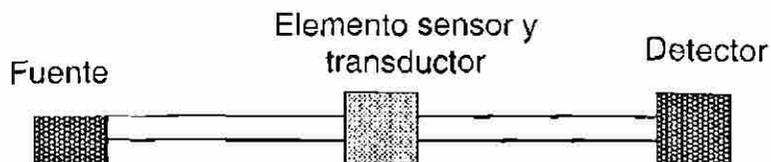


Figura 5.1 Elemento sensor

Las pérdidas en las uniones (conectores o empalmes) son especialmente críticas pues afectan directamente en la potencia de salida que se está registrando. Cuando se usan tramos largos de fibra, entonces también se debe considerar la atenuación de luz a lo largo del enlace.

El circuito de sensado debe estar acondicionado para discriminar los efectos de otros estímulos indeseables sobre la fibra (variaciones de otras variables).

#### **5.4 Modulación por fase Tipo A: sensores interferométricos**

Los sensores modulados por fase buscan medir el corrimiento de fase de dos o más haces coherentes. Este desfase es producido por la excitación que se quiere medir. Por ejemplo, se usan cambios de presión, temperatura, etc. para producir una pequeña variación en el índice de refracción lo cual atrasa o acelera, según los valores que tomen las variables y la transmisión de la luz dentro de la fibra.

La fibra que se usa en estos sensores es siempre fibra monomodo (4 a 10  $\mu\text{m}$  de núcleo) ya que así se evita el problema de la dispersión modal. Sin embargo, esto dificulta los acoplamientos de las uniones de los emisores y detectores.

Los emisores más comunes son los diodos láseres ya que garantizan un buen acoplamiento y alta transmisión de potencia. Sin embargo este factor aumenta el costo y es la principal razón de que los sensores de amplitud estén más desarrollados y comercializados.

Una de las ventajas más grandes de los sensores interferométricos es que son muy sensibles a pequeños cambios.

A continuación se muestra la clasificación de los sensores interferométricos



Los cuatro tipos de interferómetros más populares se describen a continuación.

### 5.4.1 Interferómetro de Mach-Zehnder

Este es el Interferómetro más fácil de fabricar. Consiste de dos tramos de fibra entre dos acopladores de 3 dB. Una rama funciona como referencia mientras que la otra es la rama sensora.

Así, la rama de referencia se aísla del efecto y la rama sensora se expone a él.

La luz de la fuente generalmente un diodo láser, se divide en el primer acoplador y atraviesa los dos brazos para recombinarse en el segundo acoplador. Uno o más fotorreceptores convierten la señal a eléctrica para su procesamiento.

Con un arreglo como éste se pueden detectar desfases de  $1 \mu\text{radián}$  de la longitud de onda de la luz utilizada. El sensor sólo necesita experimentar un pequeñísimo estímulo para que el efecto sea detectable.

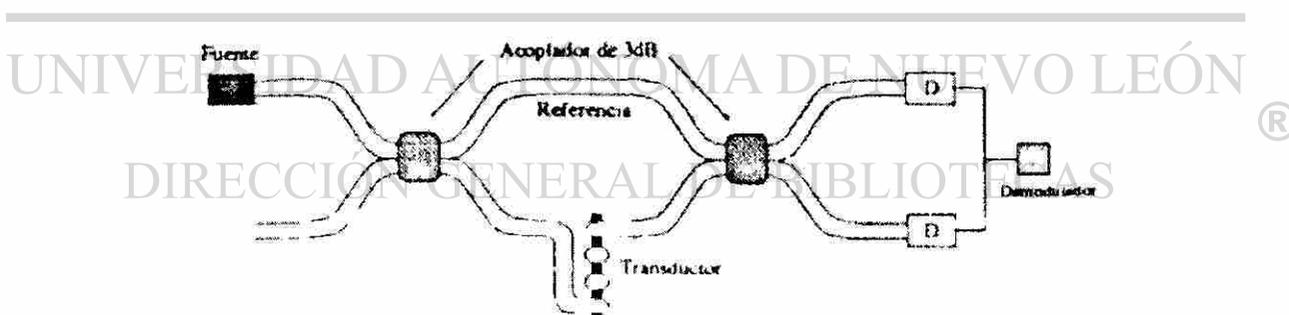


Figura 5.2 a Interferómetro de Mach-Zehnder

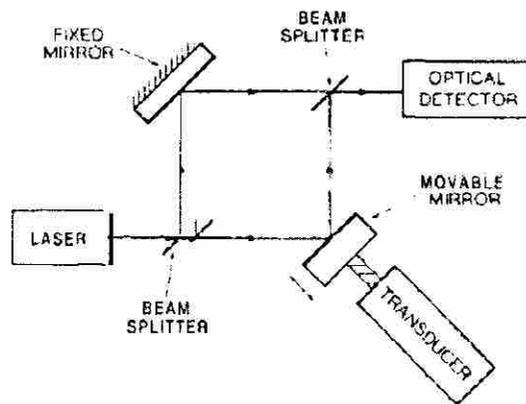


Figura 5.2 b El principio del interferómetro Mach-Zehnder

Cualquier efecto (presión, temperatura, campos eléctricos o magnéticos) que produzcan una variación de longitud (o índice de refracción) de 0.001 angstroms es candidato para medirse con el interferómetro de Mach-Zehnder.

Existen dos métodos para sensar las perturbaciones en la fibra:

- a) Usando una bobina: Aquí la fibra sensora se enrolla a presión en un cilindro
- b) Usando un revestimiento especial que presente mayor sensibilidad a un determinado estímulo.

#### 5.4.1.1 Sensores Acústicos

Este arreglo se utiliza mucho en los sensores acústicos dentro del agua. Aquí la rama de referencia se aísla de cualquier perturbación sonora mientras que la rama sensora se expone al campo acústico. Como la presión acústica distorsiona la fibra, se cambia la longitud efectiva y altera la fase relativa de la luz entre las dos fibras.

Cuando los dos haces se recombinan y actúan sobre la superficie del fotodetector, entonces la señal se demodula. Como requisito para que se

produzca el efecto, es necesario usar una luz coherente y una fibra monomodo.

Típicamente para una bobina de fibra de 1 m de largo, un cambio de 0.5  $\mu\text{m}$  produce un 100% de modulación del rayo de luz. Si la fibra es más grande se obtendrá una mayor sensibilidad.

#### 5.4.1.2 Termómetros

Los sensores de temperatura más precisos hacen uso del interferómetro de Mach-Zehnder. El funcionamiento es similar al sensor acústico, el cambio en la temperatura resulta en un cambio en la fase de la señal:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta T} = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[ \frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right]$$

Para fibras de sílica, el término de la variación del índice con la temperatura, domina sobre el cambio de longitud. Típicamente para una fibra de sílica  $(n \, dL/dT) = 5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$  y  $(dn/dT) = 0.68 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$  a una longitud de onda de 632.8 nm\*,  $(\Delta\phi / L\Delta T) \approx 106 \text{ rad} / ^\circ\text{C}$ .

Sin embargo, mantener la sensibilidad del interferómetro de Mach-Zehnder puede ser muy difícil. Primero, la diferencia de la longitud entre las bobinas no debe exceder 1/4 de la longitud de onda para así obtener una precisión de 1/8 de longitud de onda. Segundo, la fibra monomodo permite la transmisión de dos modos de polarización, estos dos modos se pueden desfasar y provocar interferencia. Tercero, las fibras que se usan varían ante diversos estímulos como temperatura, presión, etc.

Una diferencia de 0.001 grados en la temperatura de las ramas ya puede provocar un cambio en la longitud. Para solucionar esto se han diseñado fibras con revestimientos especiales que aíslan la temperatura.

Resumiendo para el interferómetro de Mach-Zehnder:

Ventajas: Ideal para sistemas simples

Fácil de construir

Desventajas: Requiere dos acopladores

Requiere más fibra que el interferómetro de Michelson

El control de estabilidad puede resultar muy complicado

#### 5.4.2 Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson es similar en funcionamiento al de Mach-Zehnder, sin embargo, sólo la mitad de la fibra es necesaria para obtener la misma sensibilidad ya que los espejos regresan la luz por la misma fibra. En adición, sólo se necesita un acoplador.

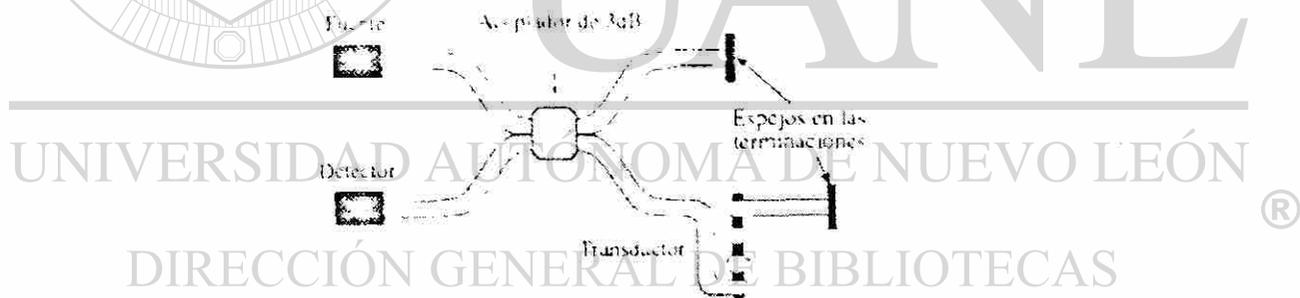


Figura 5.3 a Interferómetro Michelson

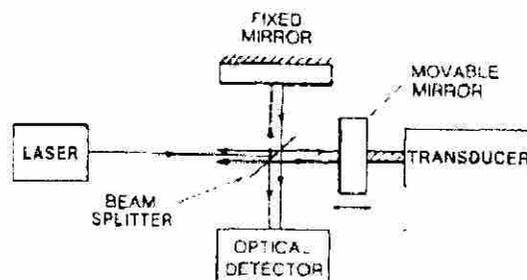


Figura 5.3 b El principio del interferómetro Michelson

El punto débil del arreglo es que los espejos necesitan acoplarse a la fibra y son una fuente de ruido hacia el receptor. Para reducir el efecto se utilizan fuentes pulsadas en sincronía con receptores disparados por tiempo.

Para el interferómetro de Michelson:

**Ventajas:** Requiere sólo un acoplador  
Menor longitud de fibra  
Fácil de usar en telemetría

**Desventajas:** Requiere superficies reflejantes  
Genera ruido en las reflexiones de la luz.

#### 5.4.3 Interferómetro de Sagnac

El interferómetro de Sagnac es un sensor de rotación (o giróscopo óptico). Fue creado por G. Sagnac en 1913. En aquella época no se tenían los recursos tecnológicos actuales, así que no se desarrolló hasta los tiempos modernos ya con fibras ópticas y fuentes láseres. Ahora se usa en navegación marítima y viajes espaciales, de hecho el giróscopo óptico es el sensor de fibras ópticas más desarrollado por la industria.

En la configuración clásica del interferómetro de Sagnac (IFOG: Interferometric Fiber Optic Gyro) la luz procedente de una fuente láser se divide (con un acoplador) en dos componentes que se acoplan a una bobina de diámetro  $2R$  y  $N$  vueltas. Una rama da la vuelta en sentido de las manecillas del reloj y la otra en sentido contrario. Después de pasar a través de la bobina los haces se recombinan en el acoplador y se detecta la interferencia entre ellos.

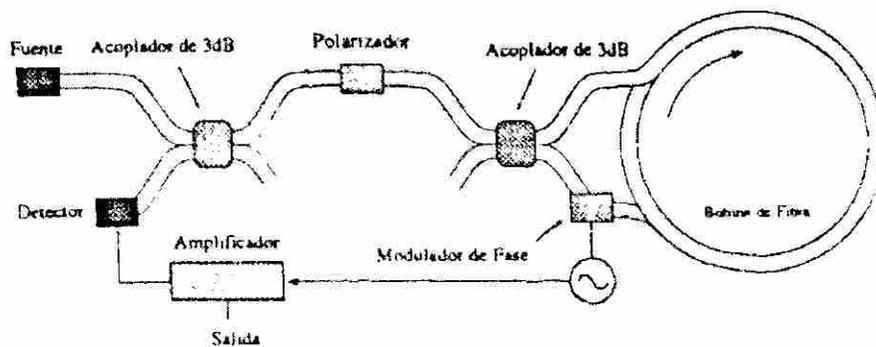


Figura 5.4 a IFOG o giróscopo interferométrico de Sagnac

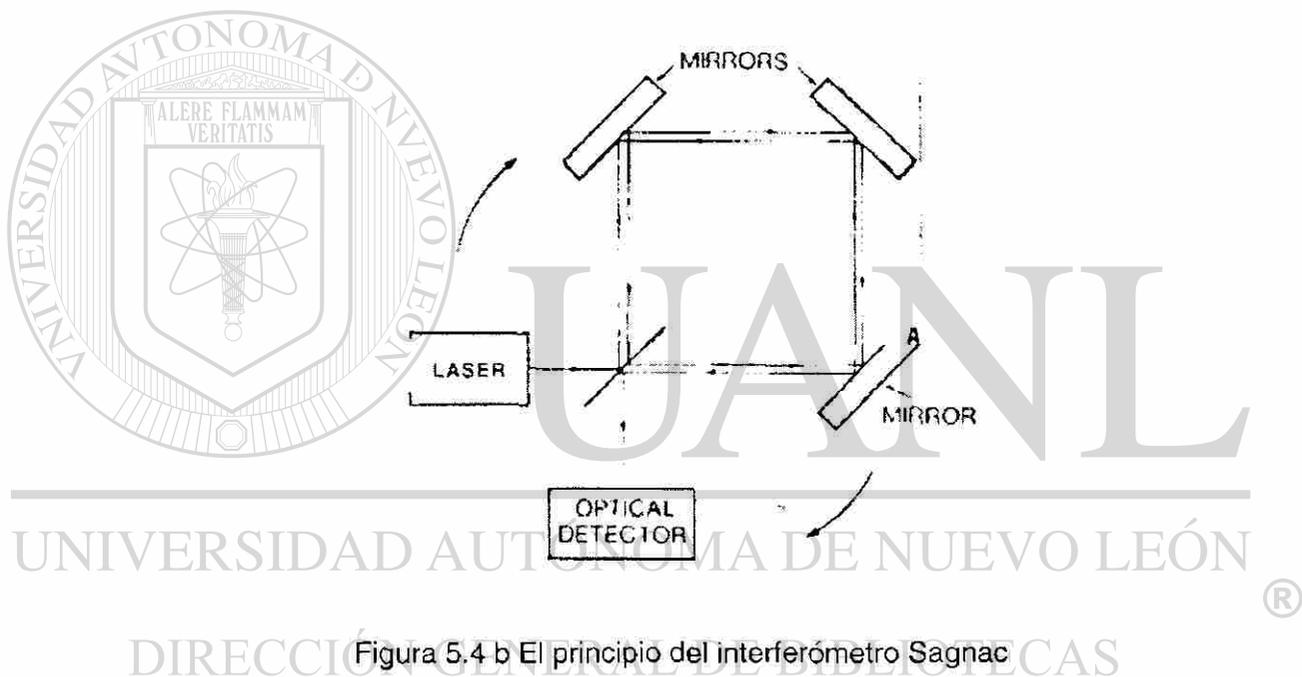


Figura 5.4 b El principio del interferómetro Sagnac

Cuando la bobina no gira se tiene una detección estable y la luz recorre una distancia constante dentro de las dos ramas. Si el cilindro empieza a girar, la luz de una de las ramas recorrerá menor distancia mientras que la otra recorrerá más. Si la velocidad de rotación es  $\omega$  (grados/seg.) se tiene un corrimiento de fase de:

$$\Delta\delta = \frac{8N\pi^2}{\lambda v} \omega$$

Donde:  $v$  = velocidad de la luz en a fibra

$\lambda$  = longitud de onda de La luz

La intensidad detectada por el receptor está dada por la expresión:

$$I = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos(2\Delta\delta)]$$

donde  $I_0$  es la intensidad registrada en ausencia de rotaciones.

La sensibilidad del giróscopo se halla con:

$$S = \frac{1}{I_0} \frac{dI}{d(2\Delta\delta)} = \frac{1}{2} \text{sen}(2\Delta\delta)$$

De la ecuación anterior se ve que para pequeñas rotaciones se tiene una sensibilidad muy pequeña. Para corregir el problema se incluye en el giróscopo un modulador de fase, cuya finalidad es introducir un corrimiento de 90 grados entre los dos rayos, con lo cual ahora la intensidad viene dada por:

$$I = \frac{1}{2} I_0 [1 - \text{sen}(2\Delta\delta)]$$

Así, la sensibilidad es ahora:

$$S = \frac{1}{I_0} \frac{dI}{d(2\Delta\delta)} = \frac{1}{2} \cos(2\Delta\delta)$$

Ahora, para pequeños cambios se tiene una sensibilidad prácticamente de 0.5 ya que el coseno es casi 1.

Como ejemplo se puede tomar una bobina de 1000 vueltas y 20 cm de diámetro, rotando a 1 grado/hr, produce un corrimiento de  $10^{-5}$  rad (asumiendo una  $\lambda$  de  $1 \mu\text{m}$ ).

El IFOG tiene la característica de que la luz permanece dentro de la fibra desde el emisor hasta el receptor, esto le permite minimizar el ruido.

Dentro de los efectos indeseables se presenta la birrefringencia. Como la fibra es monomodo, permite la propagación de dos modos de polarización perpendiculares, que al viajar en la fibra birrefringente producen un corrimiento.

Otro efecto es la retrodispersión de la luz a lo largo de la fibra que siempre se presenta en el receptor. Este problema es particularmente crítico en los conectores o empalmes que se tengan en el camino de la fibra.

Ventajas: La bobina no necesita ser circular.  
Las pérdidas en el acoplador no son críticas.

El control de la longitud de la trayectoria no es crítico.

Desventajas: Se requiere mucha fibra para tener alta precisión.  
La sensibilidad de los componentes electrónicos aún no está muy desarrollada.

#### 5.4.4 Interferómetro resonador

Aquí se transmite luz de una fuente altamente coherente hacia un acoplador (2 a 2) de 3 dB. Una de las ramas del acoplador continúa hacia la bobina de prueba mientras que la otra rama se conecta al detector. La terminación de la bobina llega al acoplador de nuevo y se produce interferencia del haz original con el haz procedente de la bobina.

El resultado se registra por la rama que queda libre y que llega al detector.

Esta interferencia puede ser constructiva o destructiva dependiendo de lo largo de la bobina. El proceso de detección se produce al excitar una parte de la fibra en la bobina produciendo un cambio de intensidad en la salida.

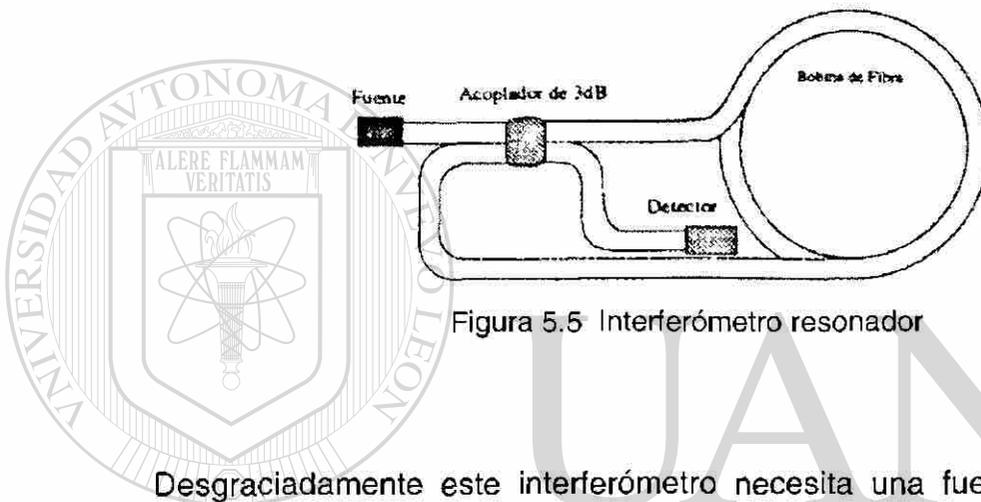


Figura 5.5 Interferómetro resonador

Desgraciadamente este interferómetro necesita una fuente de luz muy coherente y un acoplador que casi no presente pérdidas para tener un buen nivel de señal a ruido (SNR).

**Ventajas:** Poca longitud de fibra.  
Sensado por cambios de intensidad o conteo de franjas

**Desventajas:** Luz altamente coherente  
Acoplador de poca pérdida  
Control riguroso de las distancias de las ramas.  
Presencia de retrodispersión coherente.

### 5.5 Modulación por frecuencia: Tipo F

El sensor de modulación por frecuencia se basa en el efecto Doppler. Este consiste en lo siguiente:

Si una radiación de frecuencia  $f$  está incidiendo sobre un cuerpo que se mueve a velocidad  $v$  vista desde algún observador, entonces la radiación reflejada desde el objeto aparenta tener una frecuencia  $f_1$  donde:

$$f_1 = \frac{f}{1 - v/c} \approx f \left[ 1 + \frac{v}{c} \right]$$

Este cambio de frecuencia se mide para construir sensores de movimiento o de velocidad y se usa también para construir medidores de flujo.

### 5.6 Modulación por distribución de longitud de onda: Tipo W

Estos sensores se basan en el hecho de que muchos fenómenos físicos pueden influenciar en la intensidad de la luz reflejada o transmitida con la longitud de onda de la luz. La idea es monitorear el espectro de salida de la luz.

Aquí la fibra sólo sirve para llevar luz a una región y regresarla hacia algún detector.

Un problema consiste en que los materiales presentan diferentes atenuaciones para diversas longitudes de onda, además, es necesario tener emisores y receptores con buena respuesta para diversas longitudes de onda.

Un ejemplo de este sensor es un medidor de PH. En este caso se induce luz a una substancia a través de la fibra y se usa otra fibra para llevarla al receptor.

## 5.7 Modulación por polarización: Tipo P

Existen muchos fenómenos que alteran el estado de polarización de la luz ( p.ej. birrefringencia, campos eléctricos y magnéticos etc.) dentro de una fibra.

La medición de estos cambios es uno de los métodos más poderosos para construir sensores con fibras ópticas.

Los sensores de polarización más comunes son los medidores de voltaje y corriente. En éstos se aprovecha el efecto Faraday aplicando un campo **B** longitudinal a la fibra para producir una rotación en la polarización perpendicular a la trayectoria del haz.

Como se vio en la ecuación  $\theta = VBL$  del punto 5.1.5 (efecto magneto-óptico)

donde:  $V$  = Cte. de Verdet

$B$  = Flujo magnético paralelo a la dirección de la propagación

$L$  = Longitud expuesta de la fibra.

Para las fibras de sílica la constante de Verdet es muy pequeña, alrededor de  $10^{-2}$  min/A. Esto hace que el efecto sólo sea práctico para corrientes y voltajes muy altas.

El esquema del medidor de voltaje por efecto Faraday se muestra en la figura.

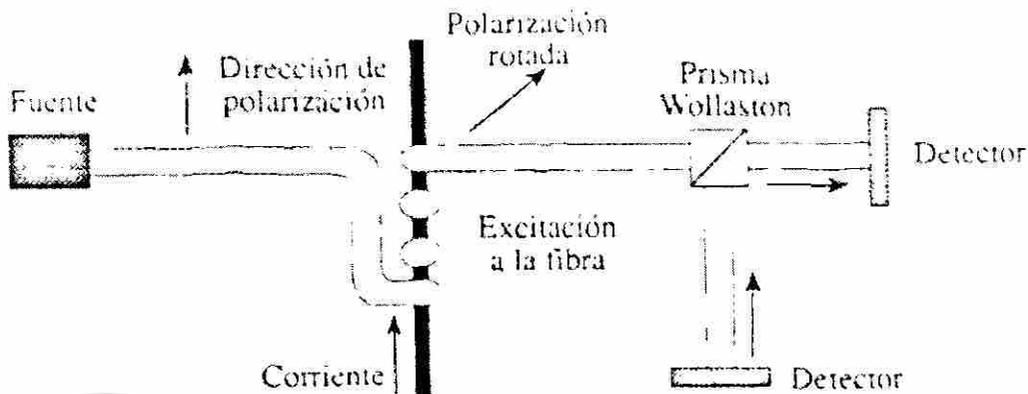


Figura 5.6 Arreglo para medir voltaje o corriente

El funcionamiento del medidor de voltaje es como sigue:

Una fibra monomodo se enrolla alrededor de un conductor con corriente. Por la fibra hay que pasar una luz polarizada linealmente. Al final de la fibra se tiene la luz con un corrimiento de la polarización. La luz se divide con un prisma de Wollaston que separa las dos componentes perpendiculares y se analizan por separado.

La intensidad relativa se puede calibrar para leer corrientes. Con arreglos como éste se han medido corrientes de hasta 5000 amp con un tiempo de respuesta de  $0.5 \mu\text{s}$ .

### 5.8 Sensores con fibras ópticas por aplicación

A modo de síntesis se mencionan brevemente las características de tres clases de sensores:

- a) de temperatura, b) de presión y c) magnéticos

Los datos que se incluyen para cada clase de sensor son:

- 1) Principio de operación.
- 2) El tipo de emisor usado.
- 3) El tipo de fibra.
- 4) El tipo de receptor.
- 5) Rango de operación y sensibilidad.
- 6) Comentario.

El número 1 se refiere a un sensor intrínseco, mientras que el número 2 a un sensor extrínseco. Así, por ejemplo, un sensor tipo A-2 es del tipo de cambio de fase y extrínseco.

### **5.8.1. Sensor de temperatura**

#### **5.8.1.1 Tipo I-1 Sensor por índice de refracción**

- 1) Cambio en el índice de refracción del núcleo y revestimiento (Sin embargo la luz se pierde en la frontera).
- 2) LED o LD
- 3) SM o MM
- 4) PIN o APD
- 5) Entre 80 y 700° C con una precisión de  $\pm 1^\circ$  C
- 6) Fácil de construir y calibrar (Se puede usar un receptor típico de infrarrojo)

### 5.8.1.2 Tipo A-1 Sensor interferométrico

- 1) Basado en el esquema de Mach-Zehnder
- 2) LED o láser visible
- 3) SM Fused sílica
- 4) Receptor típico ( Por el método de detección coherente)
- 5) Entre  $-50$  y  $200^{\circ}$  C con una precisión de  $0.1$  a  $1^{\circ}$  C. ( Para una fibra de sílica pura a una longitud de onda de  $633 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\theta / L\Delta T \approx 106 \text{ rad/m}^{\circ}\text{C}$ ).
- 6) Muy sensible, pero se necesita un arreglo con acopladores.

### 5.8.1.3 Tipo I-2 Radiación de cuerpo negro

- 1) Se basa en la radiación que incide en la fibra por algún objeto
- 2) No hay emisor, lo que asegura dificultades de acoplamiento
- 3) Fibra MM
- 4) Receptor típico
- 5)  $250$  a  $650^{\circ}$  C
- 6) Muy simple de hacer.

## 5.8.2. Sensor de presión

### 5.8.2.1 Tipo I-1 Microcurvaturas

- 1) La luz se sale en las microcurvaturas causando la pérdida de modos. (La fibra se somete a 2 placas con rugosidades).
- 2) Láser visible.
- 3) Fibra MM, rectangular o parabólica.
- 4) De acuerdo al transmisor.
- 5) No aplica .
- 6) Se pueden obtener altas precisiones.

### 5.8.2.2 Tipo A-1 Sensores interferométricos

- 1) Se basa en el arreglo de Mach-Zehnder.
- 2) Luz láser coherente.
- 3) MM.
- 4) Un receptor acorde al transmisor.
- 5) No aplica
- 6) La señal que se recibe es la combinación de la luz original más la luz modificada, así que se tiene que demodular la señal. Se debe diseñar un circuito capaz de hacer esto. Las limitantes son:
  - a) El largo de las dos bobinas no puede diferir por más de  $1/4$  de longitud de onda. Lo que hace muy dependiente de la temperatura al sistema.
  - b) Una fibra MM permite dos polarizaciones, lo que causa ruido en la medición.
  - c) El sistema es muy dependiente de la temperatura.

### 5.8.3 Sensores magnéticos

#### 5.8.3.1 Tipo P-1 por rotación de Faraday

1. El ángulo de polarización de una onda plana cambia según la ecuación del efecto magneto-óptico.
2. LD ó láser.
3. Fibra SM. (Algunas se dopan).
4. No aplica
5. Para las fibras de sílica la constante de Verdet es de  $1.5 \times 10^{-2}$  min/A, por lo que sólo se pueden aplicar a grandes voltajes y corrientes. Se han medido corrientes del orden de 5000 amp con un tiempo de respuesta de  $1 \mu s$  y una precisión del 1%.
6. Las fibras no deben ser birrefringentes.

### 5.8.3.2 Tipo P-2 Sensores de corriente y voltaje

1. Utilizan el efecto Pockel. El cristal más adecuado es el  $\text{LiNbO}_3$ . Las constantes de algunos materiales se dan en las tablas pasadas.
2. ILD o Láser
3. Fibra SM
4. No aplica
5. Se pueden medir voltajes arriba de 500 Kv con un tiempo de respuesta de 1 ns y una exactitud del 0.1%.
6. No aplica



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# CAPÍTULO 6

## EJEMPLO DE UNA EXPERIMENTACIÓN CON SENSORES INTERFEROMÉTRICOS

### 6.1 Introducción

Entre los sensores de fibras ópticas, los sensores interferométricos son los más sensibles y precisos que se construyen actualmente. El marco teórico y las aplicaciones de este tipo de sensores ya se expusieron en el capítulo 5 Sensores con fibras ópticas.

Como parte de las pruebas realizadas, se implementó un interferómetro resonador con un acoplador 50:50 de fibra monomodo de 10  $\mu\text{m}$ . En este capítulo se describe este arreglo, así como algunos resultados experimentales y conclusiones obtenidas en el laboratorio.

El propósito del capítulo es servir como referencia a aquellos interesados en construir un arreglo de este tipo. Primero se describen las características de un acoplador de fibra óptica. Se presenta la matriz de pérdidas del acoplador utilizado en el laboratorio y se muestra el procedimiento para calcular la intensidad esperada para el interferómetro resonador.

Al final se señalan algunos problemas que se pueden presentar al construir un interferómetro resonante.

## 6.2 Antecedentes

Un elemento básico en la mayoría de los sensores interferométricos es el acoplador. Un acoplador de  $m$  entradas y  $n$  salidas se puede representar mediante la Figura 6.1.

El acoplador no es más que un dispositivo que permite dividir o mezclar un haz de luz en varios o varios en uno. Evidentemente se espera tener pérdidas en el acoplamiento.

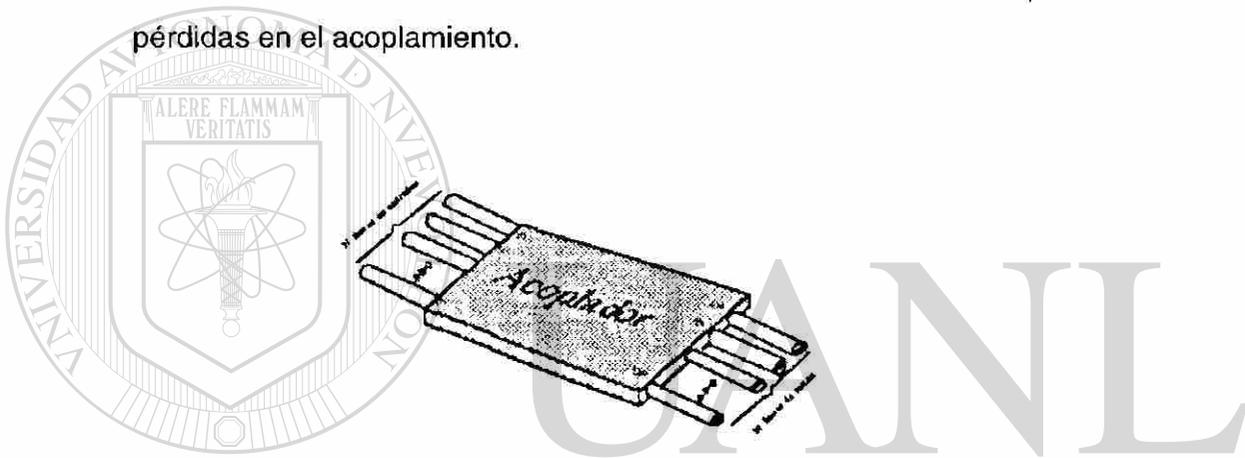


Figura 6.1 Acoplador general de  $N$  entradas y  $M$  salidas de luz

El acoplador se usa para compartir la misma señal a varios destinos al mismo tiempo lo cual lo hace tan importante en sensores interferométricos.

### 6.2.1 Tipos de acopladores

Los acopladores se utilizan principalmente en enlaces de corta distancia, en los que se pueden tolerar algunas pérdidas. Los diseños varían mucho dependiendo del tipo de aplicación y del tipo de fibra que se use.

### 6.2.1.1 Acoplador Árbol

Un acoplador árbol es usado para dividir una señal óptica en varias a la vez, o para combinar varias señales en una sola. Los acopladores árbol generalmente dividen la potencia óptica por partes iguales en sus salidas. La configuración se denota por 1:n; donde 1 es el número de entradas y n el de salidas. El rango de salida abarca de 2 a 32 puertos generalmente. La mayoría de los acopladores son bidireccionales, es decir, que pueden actuar como divisores o combinadores.

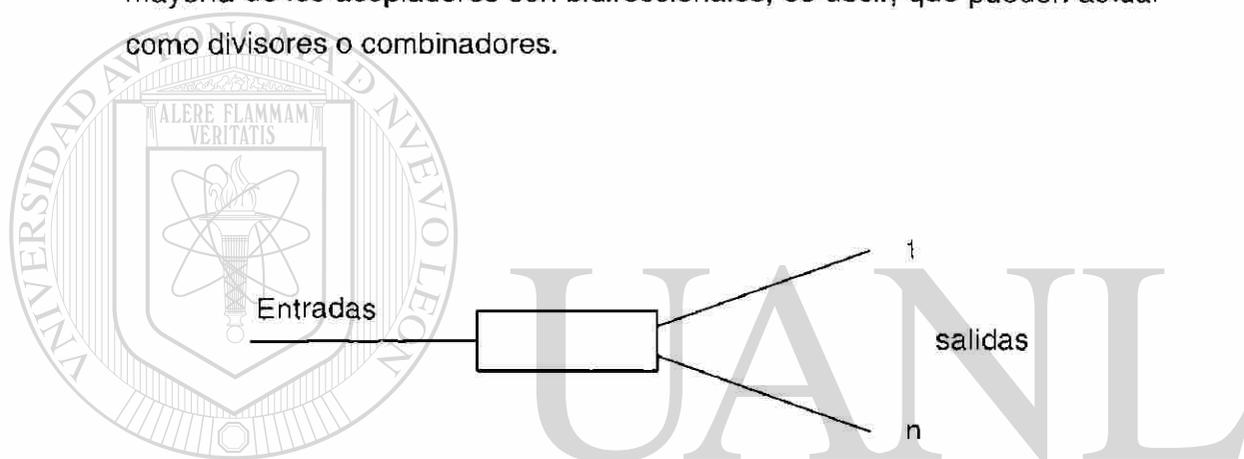


Figura 6. 2 Acoplador tipo árbol

Una de las aplicaciones más interesantes de un acoplador árbol es como multiplexer por división de longitud (WDM/WDDM). Un WDM combina (multiplexea) señales independientes de diferentes longitudes de onda a una sola fibra.

Un WDDM puede ser usado para separar (demultiplexar) señales con múltiples longitudes de onda de una sola fibra hacia varias fibras, cada fibra transmitiendo a una diferente longitud de onda. La mayoría de los WDMs combinan ambas funciones en un solo dispositivo, de esta forma una fibra puede ser aislada de otra cuando el dispositivo es usado en forma direccional.

### 6.2.1.2 Acoplador Estrella

Un acoplador estrella tiene generalmente el mismo número de entradas y de salidas ( $n \times n$ ). Una señal en alguno de los  $n$  puertos de un lado se distribuye de igual forma en los  $n$  puertos del otro lado. La Figura 6.3 es un ejemplo de acoplador  $2 \times 2$ . Un acoplador estrella también puede tener desigual número de entradas y salidas. Esta configuración se designa como  $m \times n$ . Para el experimento se utilizó un acoplador de este tipo.

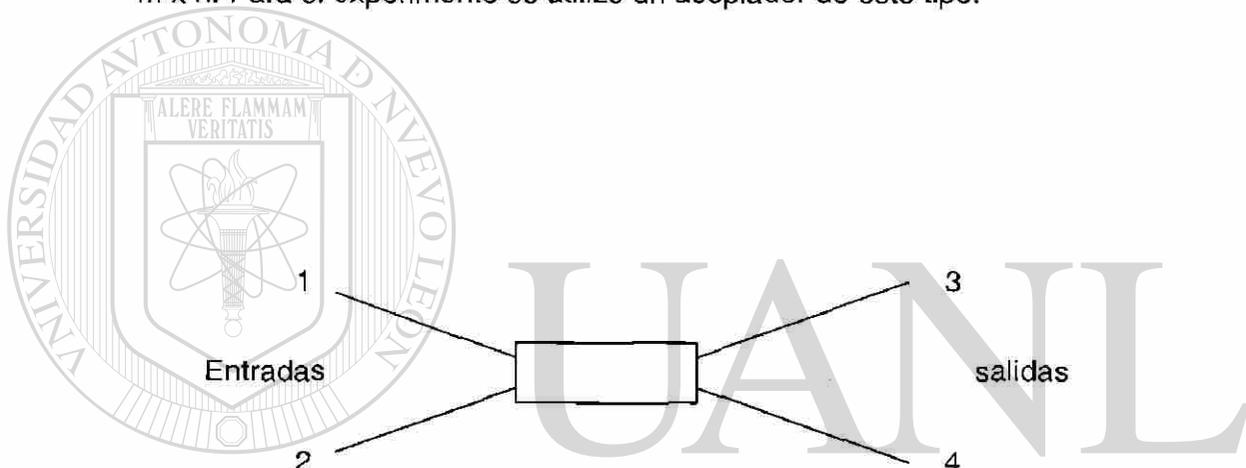


Figura 6.3 Acoplador tipo estrella

### 6.2.1.3 Acoplador Tap

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Un acoplador tap es un acoplador árbol con una relación desigual de transmisión de luz. Usualmente tiene una configuración 1:2. Los valores típicos son 10%-90% ó 20%-80%.

### 6.2.2 Matriz de pérdidas del acoplador utilizado

Una forma común para representar las pérdidas en un acoplador es por medio de una matriz. La matriz muestra la pérdida de inserción para cada combinación de entradas y salidas. La siguiente tabla muestra la matriz de pérdidas del acoplador estrella de 2 por 2 utilizado en el laboratorio.

Tabla 6.1 Matriz de pérdidas del acoplador utilizado. Las pérdidas se expresan en dB.

		Salida (j)			
		1	2	3	4
Entrada (i)	1	-46.2	-45.5	-3.8	-3.7
	2	-46	-44.5	-3.7	-3.7
	3	-3.7	-3.8	-45.4	-45.4
	4	-3.7	-3.8	-44.2	-45.4

Lo que la matriz indica es que si se induce luz por el puerto 1, entonces a la salida, por el puerto 3, se tienen 3.8 dB de pérdida.

La matriz está arreglada de tal forma que cada puerto se muestra como entrada y salida. Esto permite desplegar las pérdidas de transmisión en ambas direcciones, y en un momento dado la luz que regresa por la misma rama.

### 6.3 Descripción del arreglo

A continuación se analiza la interferencia en el acoplador y se describe el arreglo experimental. En el análisis se aplican algunas ecuaciones generales de superposición de ondas para llegar a las ecuaciones que predicen el comportamiento de la luz en el acoplador.

#### 6.3.1 Análisis de la interferencia en el acoplador

Un diagrama de la configuración del interferómetro se muestra a continuación:

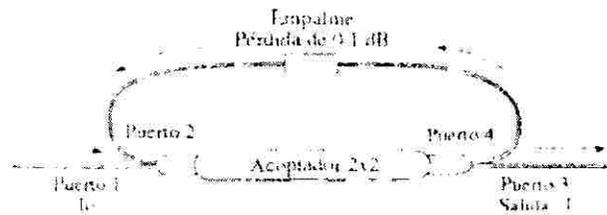


Figura 6.4 Configuración del acoplador 2x2 para construir el interferómetro resonante.

El parámetro que se mide directamente en las pruebas es la irradiancia.

La irradiancia de un campo eléctrico está dada por:

$$I = \epsilon v (E^2)$$

donde:

$\epsilon$  = Constante de permitividad del medio

$v$  = Velocidad de la luz en el medio

$E$  = Vector de campo eléctrico a la salida del acoplador puerto 3.

Puesto que sólo nos importa la irradiancia relativa se pueden ignorar las constantes y poner:

$$I = \langle E^2 \rangle$$

Lo que se quiere decir con  $\langle E^2 \rangle$  es el valor promedio en el tiempo de intensidad del campo eléctrico al cuadrado o  $\langle E \text{ punto } E \rangle$ .

Si el  $E$  es la superposición de los campos eléctricos del puerto 1 ( $E_1$ ) y del puerto 3 ( $E_2$ ), entonces:

$$E_1 = E_{01} \cos(K_1 z - \omega t + \epsilon_1) \text{ y } E_2 = E_{02} \cos(K_1 z - \omega t + \epsilon_2)$$

$$E^2 = \langle E \text{ punto } E \rangle = \langle (E_1 + E_2) \text{ punto } (E_1 + E_2) \rangle = E_1^2 + E_2^2 + 2 \langle E_1 \text{ punto } E_2 \rangle$$

Para el caso del acoplador sólo existe una dimensión, por tanto  $E$  es un vector unidimensional. Sustituyendo  $E_1$  y  $E_2$  y tomando el promedio en el tiempo de ambos lados, la irradiancia queda:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} = \frac{E_{01}^2}{2} + \frac{E_{02}^2}{2} + E_{01}E_{02} \cos \delta$$

Donde  $\delta$  es un ángulo de desfase que varía entre 0 y  $2\pi$  que vale:

$$\tan \delta = \frac{E_{01} \sin \varepsilon_1 + E_{02} \sin \varepsilon_2}{E_{01} \cos \varepsilon_1 + E_{02} \cos \varepsilon_2}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Expresando la irradiancia combinada  $I_{12}$  en función de las irradiancias originales:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

Esta ecuación es la más importante porque nos dice lo que podemos ver en medición. Dependiendo del valor de  $\delta$ , la irradiancia resultante puede ser mayor, menor o igual a  $I_1 + I_2$ . Los valores extremos son:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

Ahora con la ayuda de la matriz de pérdidas del acoplador se pueden saber los rangos esperados de los cambios de intensidad.

Convirtiendo las pérdidas en dB de la Tabla 6.1 a pérdidas en porcentaje aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia en dBm} = 10 \log \text{Pot (mW)} / 1 \text{ mW} = 10 \log \text{Pot (mW)}$$

se obtiene la siguiente matriz de transmisiones:

Tabla 6.2 Matriz de transmisión del acoplador.

		Salida (j)				Potencia total de salida
		1	2	3	4	
Entrada (i)	1	0	0	41.3	42.76	84.06
	2	0	0	43	42.26	85.26
	3	42.26	42.02	0	0	84.28
	4	42.52	41.78	0	0	84.30

Las transmisiones se expresan en porcentaje. Esta matriz se obtuvo a partir de la matriz de pérdidas de la Tabla 6.1. Los valores se redondearon a 2 decimales, lo que la tabla indica es que si se incide luz por el puerto 3, entonces por el puerto 2 sale el 42.02% de la luz original. La columna que está separada indica el porcentaje de la luz que sale por las cuatro ramas del acoplador en conjunto.

Los pasos para encontrar los valores de  $I_{\max}$  e  $I_{\min}$  usando las especificaciones del acoplador utilizado son:

1. Supongamos que la intensidad que llega al acoplador desde el láser, es  $I_0$ . Véase la figura 6.4

2. De la Tabla 6.2 se sabe que la intensidad que sale por el puerto 4 es  $0.4276 I_0$
3. La luz que viaja por puerto 4 se atenúa en el empalme en 0.1 dB, que corresponde al 97.72% de transmisión. Así que la intensidad que llega de entrada por el puerto 2 es  $0.9772 \cdot 0.4276 \cdot I_0 = 0.4179 I_0$
4. La luz que pasa del puerto 1 al puerto 3 es  $0.413 I_0$
5. La luz que pasa del puerto 2 al puerto 3 es  $0.43 \cdot 0.4179 I_0 = 0.1726 I_0$

6. Se concluye que:

$$I_1 = 0.413 I_0 \quad \text{e} \quad I_2 = 0.1726 I_0$$

7. Sustituyendo estos valores esperados en las ecuaciones:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$I_{max} = I_1 I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{min} = I_1 I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

se encuentran los extremos esperados:

$$I = [0.586 + 0.534 \cos \delta] I_0$$

$$I_{max} = 1.12 I_0 \quad \text{e} \quad I_{min} = 0.052 I_0$$

Estas expresiones indican que la intensidad máxima que se puede obtener a la salida del acoplador es 1.12 veces la intensidad original. También indican que nunca se podrá tener una total falta de luz, ya que el mínimo es del 5.2% de la luz original.

En la práctica es difícil conocer el valor de  $I_0$  porque no se tiene la atenuación del acoplamiento de la fuente al puerto 1. Sin embargo, lo que sí se puede medir es la potencia de luz a la salida del puerto 3 y confiar en esta medición para estimar  $I_0$  en función de las ecuaciones anteriores.

### 6.3.2 Arreglo experimental

El diagrama del arreglo se muestra en la siguiente figura:

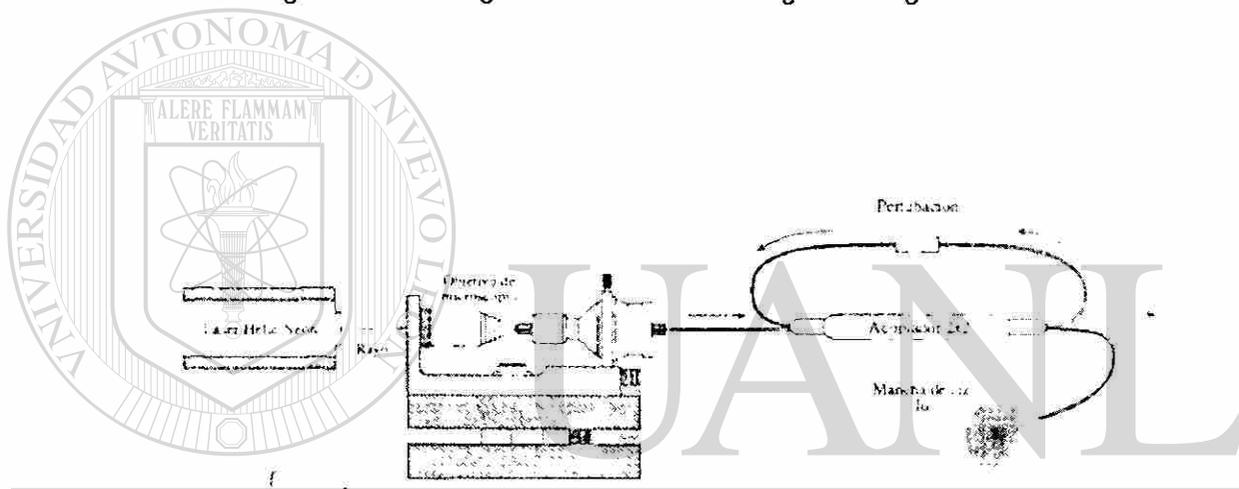


Figura 6.5 Diagrama general del interferómetro resonante

La luz del láser de He-Ne se colima con el objetivo de microscopio para introducirse al acoplador por el puerto 1.

La luz se reparte a la salida entre el puerto 2 y el puerto 4 aproximadamente a un 42% (Tabla 6.2). La luz del puerto 4 entra nuevamente al acoplador por el puerto 2. Así, la nueva luz incidente interfiere directamente con la luz original. Por el puerto 3 se monitorea la salida de la luz.

## 6.4 Resultados y comentarios

Para la unión de las fibras del puerto 2 y el puerto 4 se utilizaron dos opciones: a) un empalme de fusión y b) alineación directa por medio de la empalmadora.

Ambas opciones resultaron efectivas para transmitir la luz del puerto 4 al puerto 2. Las ventajas del empalme radican en su carácter definitivo y duradero. La ventaja de la alineación con la empalmadora consiste en la posibilidad de variar la separación de la unión de las dos fibras.

La potencia promedio que se recibió a la salida del puerto 3 fue de  $104.5 \mu\text{W}$  [-9.8 dBm]. Los valores extremos que se registraron con el medidor fueron:  $62 \mu\text{W}$  y  $145 \mu\text{m}$ . Sin embargo estos valores no concuerdan con las ecuaciones:

$$I_{\max} = 1.12I_0 \quad \text{e} \quad I_{\min} = 0.052I_0$$

Basándonos en la ecuación:

$$I = [0.586 + 0.534 \cos \delta] I_0$$

la potencia que llega al acoplador por puerto 1 es:

$$I_0 = 104.5 / 0.586 = 178.6 \mu\text{W}$$

Sin embargo con este valor de  $I_0$  los valores extremos de la intensidad deberían ser:

$$I_{\max} = 1.12 * 178.6 = 200 \mu\text{m} \quad \text{e} \quad I_{\min} = 0.052 * 178.6 = 10 \mu\text{m}$$

Estos valores distan mucho de los medidos. Pueden existir varias razones por las que las lecturas no chequen con las predicciones:

1. La pérdida en el empalme del puerto 2 al puerto 4 puede ser mayor que la utilizada en los cálculos. Si esto sucede, la intensidad de la luz que llega de retorno al acoplador por el puerto 2 es menor y por consiguiente las variaciones de intensidad a la salida también serían menores. Desgraciadamente no existe una forma directa de medir la pérdida del empalme.
2. Las variaciones de la intensidad pueden ser tan frecuentes que el medidor no tiene la suficiente velocidad de respuesta. Por tanto, sus lecturas no son confiables.
3. Las lecturas se están tomando a la salida de puerto 3, por tanto debe existir una pérdida por reflexión de Fresnel en la última frontera de la fibra que no se está tomando en cuenta para los cálculos.

Otro de los problemas que se observó con el interferómetro fue su extremada sensibilidad. Prácticamente cualquier variación de temperatura, vibración del aire, movimiento de la fibra, etc. se traducían a cambios de intensidad a la salida del acoplador. De hecho, se tenía una oscilación permanente que era muy difícil de eliminar.

La dificultad de estabilizar la potencia de salida del acoplador limitó las mediciones realizadas. Un método para minimizar estas variaciones y disminuir la sensibilidad del interferómetro consistió en incrementar la pérdida en el empalme. Al aumentar la diferencia de potencia entre las luces que interfieren se fuerza a que las oscilaciones de luz sean de menor amplitud como se comprueba de las ecuaciones de la sección 6.3.1.

Con esta restricción se hizo una prueba de sonido para comprobar la sensibilidad del interferómetro. Se utilizó una bocina para inducir sonido en el empalme que unía puerto 2 con puerto 4. El objetivo es sensar la salida óptica del interferómetro y detectar el patrón de oscilación producido por el sonido.

La potencia óptica se midió en el sensor de Newport y se monitoreaba en un osciloscopio. Las pruebas revelaron que existe un rango de frecuencias centradas en 1 kHz en el cual se maximiza el efecto del sonido sobre el sensor. Arriba de 4 kHz la señal prácticamente desaparecía.

El hecho de que exista esta banda de frecuencias más sensible se atribuye a alguna resonancia mecánica del arreglo.

Las pruebas de cambios de temperatura, presión, vibración son muy difíciles de hacer debido a la inestabilidad del sensor.

La potencia se midió con un medidor de potencia Newport modelo 820-

SL-02 calibrado a una longitud de onda de 632.8 nm.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

En este documento se mostraron al lector los criterios y problemas que intervienen en el diseño de un sistema sensor con fibra óptica. El primer paso consistió en proponer una metodología de diseño de un sistema de transmisión digital aplicable a sensores y a comunicaciones. El método parte de los requerimientos de velocidad de transmisión, distancia del enlace y fidelidad de la señal para sugerir una combinación de emisor, receptor y fibra óptica que cumpla las condiciones. Se expusieron algunos ejemplos de diseño, tanto para sensores, como para comunicaciones.

De igual manera se dieron a conocer las características básicas de cada uno de los componentes de diseño de un sistema de comunicaciones o sensado con fibra óptica, tales como los tipos de sensores que existen y usos de cada uno de ellos, los tipos de fibra óptica que hay, sus propiedades básicas, los transmisores y receptores que hay así como los componentes de interconexión para lograr un buen sistema de comunicación.

## 7.2 Recomendaciones

Dentro de las mejoras que se pueden realizar a esta tesis se encuentran:

1. El método de diseño descrito en el capítulo 1, donde sólo se enfoca a sistemas de transmisión digital y no considera sistemas análogos. Pese a que los sistemas digitales ofrecen más ventajas de inmunidad al ruido, debe reconocerse que la transmisión análoga aún se utiliza mucho en sensores con fibras; de hecho, en algunos casos, es la única forma posible de transmisión.
2. Un método de diseño para transmisión análoga necesariamente debe partir de los requerimientos SNR del receptor y debe considerar cuidadosamente las distorsiones de la señal por disposición y atenuación de la fibra.
3. También deben tomarse en cuenta las no linealidades del emisor y las fuentes de ruido del receptor con más detalle que como se hace en el método para enlaces digitales.

## BIBLIOGRAFIA

Frederick C. Allayd  
Fiber Optic Handbook  
Mc. Graw Hill

1989

Fiber Optic Market Place

[http://www.yahoo.com/Business and economy](http://www.yahoo.com/Business_and_economy)

Gutierrez Vega Julio Cesar, M.C

Diseño de sistema sensor con fibra óptica

ITESM

1995

---

Joseph C. Palais

Fiber Optic Communications

Prentice Hall

Leopoldo Rene Villarreal Jimenez, M.C

Sistemas de comunicación a través de fibras ópticas

FIME-UANL

Junio de 1997

Optical Cable Corporation

<http://www.occfiber.com>

## Listado de Tablas

Tabla	Página
2.1 Características de los transmisores	13
2.2 Comparación de las características de varios emisores	14
2.3 Características generales de las fibras ópticas	15
2.4 Recubrimiento de fibras ópticas transductoras	17
2.5 Características de los detectores	18
2.6 Comparación de las características típicas de los fotodetectores	19
2.7 Elementos de ruido y degradación	20
3.1 propiedades y beneficios al utilizar una fibra óptica	32
3.2 Campos de aplicación y características de las fibras ópticas	34
3.3 Relación entre medio e índice de refracción de distintos medios	44
3.4 Tabla comparativa entre Pigtail y ADM	63
3.5 Relación de tamaño de núcleos de revestimiento de Pigtail	64
3.6 Tabla comparativa del ADM	64
3.7 Comparación entre un PNO un PIN y un APD	68
4.1 Atenuación de distintas fibras ópticas	79
4.2 Pérdidas por empalmes	79
4.3 Pérdidas por conectores	79
4.4 Pérdidas intrínsecas	79
4.5 Capacidad de transmisión de distintos medios de comunicación	89
4.6 Relación entre tamaño, atenuación y ancho de banda	90
5.1 Constantes fotoelásticas para algunos materiales	98
5.2 Constante de Verdet para algunos materiales	99
6.1 Matriz de pérdidas del acoplador	123
6.2 Matriz de transmisión del acoplador	126

## Listado de Figuras

Figura	Página
2.1 Esquema de un sistema óptico punto a punto con algunos elementos que intervienen en sistemas sensores con fibra óptica	10
2.2 Tabla del BL digital	24
2.3 Margen de transmisión vs. Bit Rate	25
3.1 Estructura básica de una fibra óptica	30
3.2 Uso de la fibra en 1980	35
3.3 Uso de las fibras ópticas en los 80's	36
3.4 Uso de las fibras ópticas en los 90's	36
3.5 Reflexión de la luz	38
3.6 Refracción de la luz	38
3.7 Reflexión de la luz	39
3.8 Reflexión de la luz	40
3.9 Efecto de la refracción de la luz en medios menos densos	40
3.10 Efecto de la refracción de la luz en medios más densos	41
3.11 Angulo crítico	41
3.12 Propagación de la luz en distintos medios	42
3.13 Principio básico de la propagación dentro de la fibra óptica	42
3.14 Efecto de la propagación de la luz en distintos medios	43
3.15 Apertura numérica de un fibra óptica	45
3.16 Método de fusión directa	48
3.17 Método del doble crisol	49
3.18 Deposición de vapores químicos por microondas	50
3.19 Método de deposición axial de vapores químicos	51

3.20 Método de deposición de vapores por plasma de radio frecuencia	52
3.21 Deposición modificada de vapores químicos	53
3.22 Método de deposición de vapores por plasma	54
3.23 Método de deposición externa de vapores químicos	55
3.24 Intensidad máxima del LED	57
3.25 Relación de potencia emitida y costo para los distintos emisores	58
3.26 Potencia y longitud de onda de varios tipos de diodos laser	60
3.27 Transmisores ópticos laseres	61
3.28 Diagrama a cuadros de un transmisor de fibra óptica	62
3.29 Acoplamiento del Pigtail con una fibra óptica	63
3.30 Acoplamiento de un Adm con una fibra óptica	64
3.31 Partes del fotodiodo PIN	66
3.32 Fotodiodo de avalancha	67
3.33 Diagrama a cuadros de un receptor de fibras ópticas	68
3.34 Acoplamiento mecánico de la fibra con el receptor	69
3.35 Acoplamiento de un detector con un ADM	69
3.36 Parámetros del receptor	70
3.37 Ventanas de operación de la fibra óptica	70
3.38 Gráfica de la longitud de onda de operación de transmisores	71
4.1 Pérdidas por Desalineamiento	74
4.2 Pérdidas por fallas en la fabricación de la fibra óptica	75
4.3 Empalme mecánico	76
4.4 Empalme de fusión	77
4.5 Fallas en el empalme de fusión	78
4.6 Partes de un conector	81
4.7 Elementos de un conector ST	82
4.8 Separación máxima permitida	82
4.9 Distancias mínimas y máximas de la fibra con la férula del conector	83
4.10 Proceso de crimpeado	83

4.11 Ajuste de los miembros de fuerza	84
4.12 Crimpeado del casquillo del conector	84
4.13 Corte de la fibra sobrante	84
4.14 Preparación para el pulido	85
4.15 Montaje del disco pulidor	85
4.16 Efectos producidos por el pulidor	86
4.17 Fibra monomodo	86
4.18 Fibra multimodo de índice escalonado	87
4.19 Fibra multimodo de índice gradual	88
4.20 Tipos de fibras ópticas	89
4.21 Fibra óptica con buffer y sin buffer apretado	90
5.1 Elemento sensor	100
5.2 a Interferómetro de Mach-Zender	103
5.2 b El principio del interferómetro Mach-Zender	104
5.3 Interferómetro Michelson	106
5.4 Interferómetro Sagnac	108
5.5 Interferómetro resonador	111
5.6 Arreglo para medir voltaje o corriente	114
<hr/>	
6.1 Acoplador general de N entradas y M salidas de luz	120
6.2 Acoplador tipo árbol	121
6.3 Acoplador tipo estrella	122
6.4 Configuración del acoplador 2x2 para construir el interferómetro	124
6.5 Diagrama general del interferómetro resonante	128

## GLOSARIO

ADM.- (Active Device Mount), Acoplador de dispositivo activo, este dispositivo es un acoplador de conectores de fibra óptica.

APD.- (Avalanche Photodiode), Fotodiodo de avalancha, dispositivo óptico que convierte la señal óptica en señal eléctrica.

Apertura numérica . – Es la medida de la habilidad de aceptación de la luz de la fibra. La luz será aceptada y propagada si entra al núcleo en un ángulo mayor al ángulo crítico.

BER.- Bit Error Rate (tasa de error de bits), este término se emplea para determinar el porcentaje de bits transmitidos que se reciben con error.

Birrefringencia . – Esta se presenta cuando el índice de refracción no es constante dentro de la fibra.

Dispersión Cromática . – Retardo en el tiempo que experimenta el haz de luz a través de la fibra óptica monomodo.

Dispersión Modal . – Característica despreciable la cual esta en función del diámetro del núcleo, frecuencia y longitud de la fibra.

Eled . – Diodo emisor lateral.

Fibra óptica. – Filamento en forma cilíndrica que consiste en un núcleo de vidrio y un revestimiento de vidrio o plástico.

Fibra Monomodo . – Tipo de fibra que tiene un solo modo de propagación que permite que la luz viaje a todo lo largo del núcleo evitando la dispersión modal.

Fibra Multimodo . - Tipo de fibra que tiene varios modos de propagación.

Fotoemisor.- Transmisor de luz.

Fotodetectores . – Componente cuya función es convertir la señal óptica recibida en una señal eléctrica, la cual se amplifica antes de ser procesada.

Índice de Refracción (N) . – Es la razón de la velocidad de la luz en el vacío (c) para la velocidad de la luz en ese material (v).

Modos de Propagación . – Se refiere en esencia a los cambios ópticos que sigue la luz dentro de la fibra. Se determina básicamente de acuerdo a la frecuencia, el diámetro del núcleo y la variación del índice de refracción.

Núcleo (core) . – Es la sección a través de la cual viaja la luz.

PCM.- (Pulse code Modulation), Modulación de Pulsos codificados)

Pérdidas Extrínsecas . – Pérdidas causadas por desalineamiento mecánico de la unión de las fibras ópticas.

Pérdidas Intrínsecas . – Ocasionadas por la geometría de la fibra y sus características de diseño.

Pigtail.- El pigtail es un pedazo de fibra óptica en distintas longitudes con un extremo conectorizado y el otro extremo libre.

Refracción . – Cambio de dirección que experimenta un haz de luz al cambiar de un medio de propagación a otro.

Reflexión . – Cambio de trayectoria que experimenta un haz de luz al incidir en una superficie reflectora.

Revestimiento (Cladding). – Es la capa que rodea al núcleo. Su función es reflejar la luz hacia el centro de la fibra atrapándola en el núcleo.

Sensor Óptico . – Elemento que se clasifica en base al mecanismo por el cual la luz se modula para transmitir la información.

Sled . – Diodo emisor de superficie.

SNR . – Signal Noise Rate (nivel de señal a ruido).

Tight-Buffer.- Tubo apretado (en fibras ópticas, es muy importante el empaquetado de las fibras dentro de la cubierta exterior para evitar la humedad interna)

Loose – tube.- Tubo holgado (generalmente el tubo exterior de la fibra viene relleno con gel)

Velocidad de Propagación . – Velocidad de las ondas de luz dependiendo del medio en el que se encuentren.

WDM . – Modulación por división de onda.

## RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Claudio Randhú González Rojas nació en la ciudad de Papantla, Veracruz el día 6 de Agosto de 1974. Sus padres son el Q.F.B Mario González Paredes y Q.F.B. Ma. Reyna Ofelia Rojas de González . Terminó sus estudios profesionales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la U.A.N.L en Diciembre de 1997, recibiendo su título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones el 22 de Mayo de 1998.

A partir de Junio del 95 formó parte del grupo de Becarios del departamento de Tecnología de los materiales dentro de la FIME durante 2 años. También fué integrante de la asociación de estudiantes veracruzanos. Estuvo colaborando en el club de informática Central de la U.A.N.L. durante un año antes de finalizar sus estudios profesionales, al mismo tiempo que realizaba su tesis de licenciatura sobre las comunicaciones vía satélite. Comenzó a estudiar la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Telecomunicaciones llegando a concluir sus estudios con este trabajo de tesis en Junio del 2001.

