



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Eficiencia de un acoplador de fibras ópticas multipuertos (1 x N) basado en
el efecto de difracción de la luz**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A:

MARÍA BARRERA ESPARZA



DIRECTOR DE TESIS:

DR. SERGUEI KHOTIAINTSEV

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

<p>1. Datos del alumno Barrera Esparza Maria 41675297 Universidad Nacional Autonoma de Mexico Facultad de Ciencias Física 302206702</p>
<p>2. Datos del tutor Dr. Serguei Khotiaintsev</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 Dr. Enrique Lopez Moreno</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Dr. Neil Bruce</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Dr. Oleksandr Martiniuk</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Dr. Alfredo Gomez Rodriguez</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito Eficiencia de un acoplador de fibras ópticas multipuertos (1 X N) basado en el efecto de difracción de la luz. 57 p. 2010</p>

Agradecimientos:

Agradezco en este trabajo a todas las personas que me apoyaron en mi formación profesional. En especial a mi director de tesis el Dr. Serguei Khotiaintsev por su ayuda en el desarrollo experimental y teórico del presente trabajo, así como las facilidades que me otorgó para llevar a cabo las distintas tareas que implicó el desarrollo de esta tesis.

De manera especial agradezco a mis sinodales de tesis por sus acertadas correcciones y sugerencias en el desarrollo del trabajo, así como el apoyo y ayuda de mis compañeros de laboratorio: Alberto, Selene, Alfredo, Uriel, Rubén, Carmen y demás personas que me auxiliaron el desarrollo experimental.

Todo lo anterior no sería posible sin el apoyo incondicional de mi familia, mis hermanos Fernando y Sergio, tías y en especial dedicatoria hacia mi mamá.

Agradezco con gran cariño a mis amigos y novio que han estado conmigo a lo largo de años de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PÁGINA

1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA Y CONTENIDO DE LA TESIS.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	2
2. SENSORES EN FIBRAS ÓPTICAS.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Propagación de la luz en las fibras ópticas y tipos de fibras ópticas.....	5
2.3 Aplicaciones de las fibras ópticas como sensores.....	8
2.4 Conclusiones.....	9
3. ACOPLAMIENTO DE LAS FUENTES Y FIBRAS ÓPTICAS Y LOS ACOPLADORES	
EXISTENTES.....	10
3.1 Introducción.....	10
3.2 Acopladores de fusión.....	10
3.3 Proceso de fabricación.....	10
3.4 Conclusiones.....	11
4. DIFRACCIÓN DE LA LUZ Y PERSPECTIVAS DE SU UTILIZACIÓN EN LOS	
ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA.....	12
4.1 Introducción.....	12
4.2 Difracción de Fraunhofer y Fresnel.....	12
4.3 Tipos de redes de difracción.....	19
4.4 Propuesta esquemática de un acoplador multipuertos de tipo difractivo.....	21
4.5 Conclusiones.....	28

5. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA DE TIPO DIFRACTIVO.....	29
5.1 Introducción.....	29
5.2 Análisis de la eficiencia energética de acoplador.....	29
5.3 Análisis de la uniformidad de distribución de la potencia óptica en las fibras del arreglo de salida.....	30
5.4 Conclusiones.....	34
6. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....	34
6.1. Introducción.....	34
6.2. Descripción de la instalación experimental.....	36
6.3. Caracterización de la eficiencia de acoplamiento.....	45
6.4 Conclusiones.....	48
7 CONCLUSIONES GENERALES.....	49
8. APÉNDICES.....	51
8.1 APÉNDICE A.....	51
8.2 APÉNDICE B.....	51
8.3 APÉNDICE C.....	52
8.4 APÉNDICE D.....	53
9. BIBLIOGRAFÍA.....	55

1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA Y CONTENIDO DE LA TESIS

1.1 Antecedentes

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones por fibra óptica han mostrado la capacidad de transmitir grandes cantidades de información ofreciendo un servicio de alta calidad. Esto se debe a que los cables de fibra óptica son transparentes en un gran intervalo espectral y por esto soportan un gran número de canales espectrales de información. Además, las señales luminosas que viajan por la fibra óptica, no están afectadas por los campos eléctricos o magnéticos externos y tampoco producen ningún campo electromagnético en el exterior; esta última propiedad impide la interceptación de señales transmitidas por las fibras ópticas y contribuye a la protección física de la información transmitida por ellas.

Existe otro campo de aplicación de las fibras ópticas, ya que estas pueden ser utilizadas como sensores de diversas cantidades físicas. Estos sensores son capaces de transformar algunos factores de su entorno en señales ópticas y luego en señales eléctricas, de esta manera, la información sobre una cantidad física puede ser cuantificada, manipulada y procesada por sistemas electrónicos. Es así como las fibras ópticas pueden ser utilizadas como sensores para la medición de las cantidades físicas como temperatura, humedad, presión, sonido, velocidad, campos magnéticos, etcétera. Debido a la naturaleza dieléctrica de las fibras ópticas, los sensores de fibra óptica no presentan ningún peligro eléctrico y también son muy resistentes a la corrosión química, por lo cual son atractivas para las aplicaciones en biología y medicina.

En el campo de la medicina, las fibras ópticas pueden ser usadas como un indicador del nivel de oxigenación en la sangre. La sangre se compone de dos absorbentes de luz, la oxihemoglobina (HbO_2) y la hemoglobina reducida (HbR). La luz roja visible, con una longitud de onda de 660 nm, se absorbe más por hemoglobina reducida (HbR), mientras que la luz infrarroja con una longitud de onda de 940 nm, se absorbe más por la oxihemoglobina (HbO_2). Si se hacen incidir estas dos luces a través del árbol arterial o simplemente a través de un dedo u oreja del paciente, se puede obtener el porcentaje de oxihemoglobina y de hemoglobina reducida en la sangre, por medio de la cantidad de luz roja e infrarroja transmitida a un fotodetector. De esta manera se puede realizar oximetría óptica por medio de fibras ópticas. Es importante mencionar que con fibras ópticas las mediciones se pueden realizar de una manera remota, por ejemplo en un hospital en donde la unidad de medición estará en una oficina central y las fibras ópticas pasarán de una manera paralela a varios cuartos y camas de pacientes.

Con el paso de los años, los sensores en fibras ópticas obtuvieron un gran desarrollo en varias ramas de la industria y también en la ingeniería civil, en donde permiten el monitoreo del estado físico de diferentes estructuras y la detección de fisuras y grietas. En esta última aplicación se utilizan arreglos grandes de sensores que monitorean varios puntos de la estructura mediante una red de fibra óptica.

Actualmente, la función de separación de la radiación óptica de una fibra a varias fibras se logra por medio de los dispositivos acopladores de tipo fijo, estos dispositivos se fabrican de las mismas fibras ópticas por medio de su fusión controlada, a alta temperatura. A pesar de que en el mercado existe una gran diversidad de acopladores de este tipo, éstos presentan una desventaja en la experimentación con los sistemas de sensores de fibra óptica, ya que los acopladores de tipo fijo no permiten ningún cambio de los parámetros de las fibras ópticas: su diámetro del núcleo y la apertura angular, y tampoco permiten la reconfiguración del acoplador (cambio de número de los puertos de entrada y/o salida).

En el presente trabajo se investigarán las características de acoplamiento entre una fuente de luz y un conjunto de fibras ópticas basado en el efecto de difracción de la luz. La difracción de la luz permite la obtención de múltiples haces de luz y se puede controlar tanto el número de los haces como su diámetro y la apertura angular. Sin embargo, las características de un acoplador de este tipo aún requieren investigación. Entre las preguntas específicas se encuentran las siguientes: ¿Cuál será la eficiencia energética de un acoplador de este tipo, en función de los parámetros de la fuente de la radiación óptica, de las fibras ópticas, y de la rejilla de difracción? ¿Qué tan uniforme será la distribución de la potencia óptica en las fibras ópticas de salida, en función del número de canales? ¿Qué tan fácil o difícil será el acoplamiento de los haces difractados a las fibras del arreglo de salida? ¿Qué tan fácil o difícil será la reconfiguración del presente acoplador y cambio de los diámetros y apertura angular de los haces?

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es verificar teórica y experimentalmente la factibilidad y eficiencia de un acoplador de fibras ópticas multipuertos ($1 \times n$) basado en el efecto de difracción de la luz.

Como objetivos particulares se tienen evaluar la eficiencia de acoplamiento de la fuente de la radiación óptica a n fibras ópticas de la salida en función de los parámetros de la fuente, las fibras ópticas, y la rejilla de difracción; evaluar la uniformidad de distribución de la potencia óptica en las fibras del arreglo de salida; evaluar la factibilidad de modificación de varios parámetros del acoplador.

2. SENSORES EN FIBRAS ÓPTICAS.

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describen las características generales de las fibras ópticas, como son sus componentes, los tipos de fibras ópticas, su funcionamiento y sus aplicaciones como sensores.

2.2 PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS Y TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS.

Las fibras ópticas son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o plástico. Los componentes de la fibra óptica son los siguientes:

El núcleo: En sílice, cuarzo fundido o plástico - en el cual se propagan las ondas ópticas. Diámetro: 50 o 62,5 μm para la fibra multimodo y 9 μm para la fibra monomodo.

La funda óptica: Generalmente de los mismos materiales que el núcleo pero con aditivos que confinan las ondas ópticas en el núcleo.

El revestimiento de protección: por lo general está fabricado en plástico y asegura la protección mecánica de la fibra.

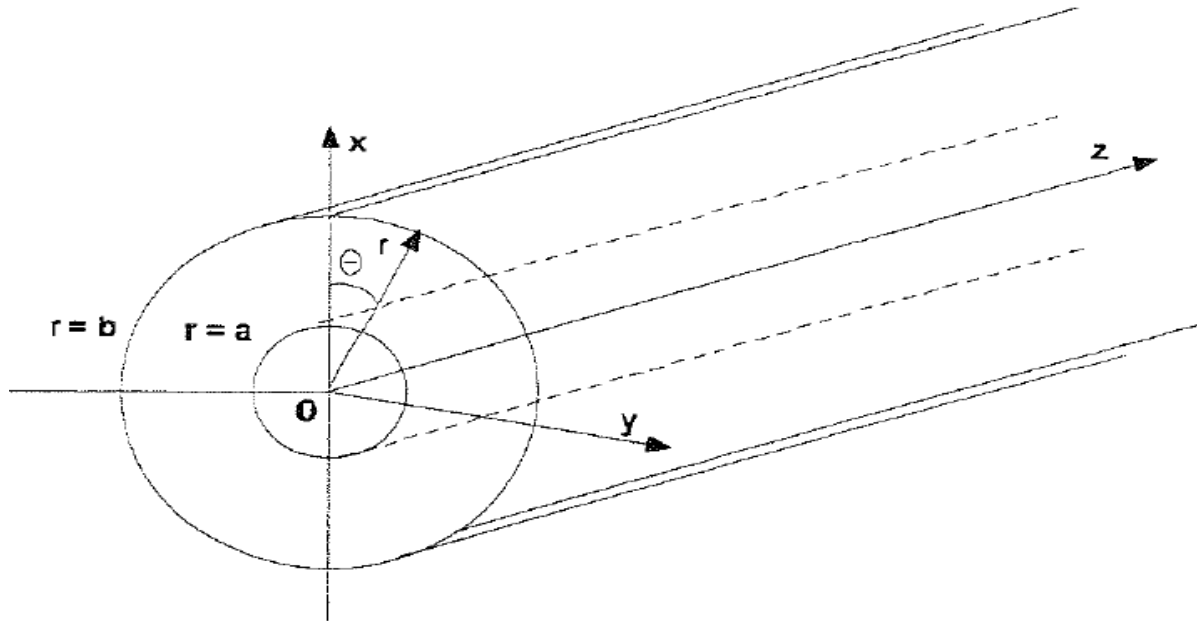


Figura 1. Diagrama del núcleo y revestimiento de la fibra óptica.

En la figura 1 se muestra la estructura de una fibra óptica, la cual cuenta con una región central de geometría circular, llamada núcleo, con un índice de refracción alto n_{co} . Este núcleo está rodeado por una cubierta de índice de refracción menor n_{cl} donde $n_{co} < n_{cl}$.

En el núcleo de la fibra óptica, se efectúa la propagación y su revestimiento es necesario para que se produzca el mecanismo de propagación.

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

- a) El diseño geométrico de la fibra
- b) Las propiedades de los materiales empleados en su elaboración
- c) La anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esa anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra.

Cuando una onda plana incide en el plano de separación de dos medios dieléctricos con distinto índice de refracción, puede experimentar dos fenómenos, reflejarse hacia el medio del que proviene, o atravesar el plano de separación entre los dos medios, con lo cual variará su trayectoria original, resultando una onda refractada.

Para las dos posibilidades anteriormente mencionadas, se relacionan dos leyes:

Ley de la reflexión: Los ángulos que forman el ángulo incidente y el reflejado con la normal a la superficie de separación de los dos medios son iguales.

$$\alpha_i = \alpha_r$$

donde α_i = ángulo incidente

α_r = ángulo reflejado.

Ley de la refracción (o ley de Snell): Los índices de refracción de los dos medios están en razón inversa de los senos de los ángulos que forman la normal a la superficie de separación con las respectivas ondas.

$$n_1/n_2 = \text{sen } \alpha_2 / \text{sen } \alpha_1$$

$$n_1 \text{ sen } \alpha_1 = n_2 \text{ sen } \alpha_2$$

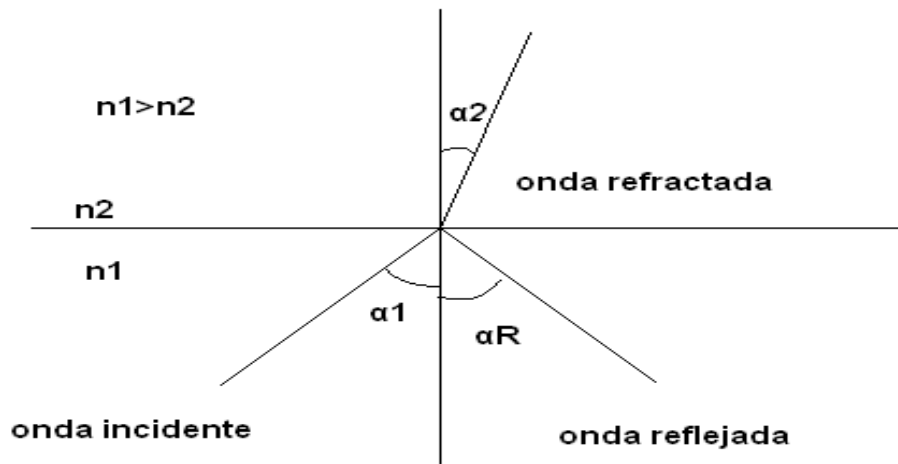


Figura 2. Diagrama de reflexión y refracción.

Se tienen los siguientes casos dependiendo de los índices de refracción:

- a) $n_1 < n_2$. Entonces será $\alpha_2 < \alpha_1$ y el rayo refractado se acerca a la normal al plano de separación de los dos medios, alejándose de dicho plano.
- b) $n_1 > n_2$. Entonces será $\alpha_2 > \alpha_1$ y el rayo refractado se acerca al plano de separación.

Si aumenta gradualmente α_1 , suponiendo que $n_1 > n_2$, se llegará hasta un valor de α_1 tal que la onda refractada esté contenida en el plano de separación de ambos medios.

A este ángulo se le denomina crítico, y se define como el ángulo de incidencia para el que la onda refractada se propague por el plano de separación de ambos medios.

Cualquier rayo que incida sobre dicho plano con un ángulo superior a este valor límite, se reflejará en su totalidad. A este fenómeno se le conoce como principio de reflexión total interna y posibilita la propagación de la luz por el interior de la fibra. (Núcleo).

Tipos de fibras ópticas

Fibras monomodo

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño (8,3 a 10 micrones) que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias (hasta 300

km máximo, mediante un láser de alta intensidad) y ofrece la mayor capacidad de transporte de información.

Fibras multimodo

Una fibra multimodo es aquella en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km; es simple de diseñar y económico.

Su distancia máxima es de 2 km y usan diodos láser de baja intensidad.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Dependiendo el tipo de índice de refracción del núcleo, tenemos dos tipos de fibra multimodo:

- Índice escalonado: en este tipo de fibra, el núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica. Esta fibra tiene alta dispersión modal.
- Índice gradual: en este tipo de fibras, el índice de refracción no es constante, tiene menor dispersión modal y el núcleo se constituye de distintos materiales.

Además, según el sistema ISO 11801 para clasificación de fibras multimodo según su ancho de banda las fibras pueden ser OM1, OM2 u OM3.

2.3 APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS COMO SENSORES.

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que se alimenta por una fuente de luz para poder producir posteriormente, una señal de salida que se relaciona proporcionalmente con una variable a medir.

Sensor basado en modulación de amplitud

La modulación de la amplitud en una fibra óptica, se puede lograr mediante curvaturas a la fibra. Una sección de la fibra se introduce entre placas con canales que provocan microcurvaturas sobre la fibra, lo cual provoca que la reflexión total interna no se cumpla y parte de la luz se escape del núcleo.

Sensor basado en modulación de color

Este tipo de sensores utiliza un par de fuentes ópticas de longitudes de onda λ_1 y λ_2 cuya luz pasa a través de un material termocroico absorbente. El material sufre un cambio en las características espectrales de absorción, es decir, con la temperatura. Estas técnicas son utilizadas para medir agentes químicos como el PH y exhiben buena sensibilidad.

Detección de fisuras en construcciones por medio de fibras ópticas

Por medio de las fibras ópticas, se pueden detectar fisuras en construcciones al insertarlas en estas, obteniendo así datos fiables en lo que se refiere al estado actual de la carga de la estructura, además de detectar el daño estructural de la misma causada por impactos y las grietas ocasionadas por fatiga en una estructura.

Estos mismos sensores se utilizan como receptores cuando se propaga una onda lanzada sobre la estructura, determinando su localización.

En grandes estructuras, se puede reducir considerablemente el costo de mantenimiento, reduciendo el área a inspeccionar mediante el uso de sensores dentro de ellas que indican la localización exacta de los defectos de la obra.

Con el fin de minimizar el número de orificios de entrada y salida para un número determinado de sensores, se pueden incorporar varios sensores en una misma fibra óptica, las técnicas para multiplicar los sensores dentro de las fibra óptica utilizan generalmente propiedades asociadas con las señales ópticas: su estado de polarización, coherencia, posición temporal relativa, longitud de onda y frecuencia. Estas técnicas están basadas en el envío de impulsos de luz a la fibra óptica. Los impulsos ópticos lanzados dentro de las fibras ópticas se reflejaran en un sensor colocado en un hilo de la fibra óptica, y regresaran a un detector en un espacio de tiempo previsible. Midiendo el tiempo de retorno de este impulso óptico, podemos distinguir las señales del sensor. Cada una de las longitudes de onda que viaja en la fibra óptica se decodifica mediante el uso de filtros. Una vez que las longitudes de onda han sido separadas, se produce la señal de cada sensor individual

2.4 CONCLUSIONES.

Debido a las características que presentan las fibras ópticas como el comportamiento dieléctrico, la capacidad para transmitir información a grandes distancias, el gran ancho de banda, entre otras, hacen posible que los sensores en fibras ópticas, puedan transformar señales físicas o químicas del entorno en señales eléctricas, haciendo que los sensores de fibras ópticas sean ampliamente utilizados para medir una gran cantidad de parámetros físicos o químicos: luz, temperatura, humedad, presión, sonido, velocidad, movimientos sísmicos, etcétera.

El buen funcionamiento de los sensores de fibras ópticas recae sobre la alta eficiencia de acopladores de fuentes ópticas en las fibras, lo cual se busca verificar teórica y experimentalmente en el presente trabajo.

3. ACOPLAMIENTO DE LAS FUENTES Y FIBRAS ÓPTICAS Y LOS ACOPLADORES EXISTENTES.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se expone información básica sobre acopladores ópticos monomodo haciendo hincapié en sus propiedades, proceso de fabricación, tecnología y tipos de los mismos.

Los acopladores ópticos se usan para ramificar o combinar señales ópticas. Se usan en redes públicas y privadas de fibra óptica para proporcionar una distribución pasiva y unión de puntos para la transmisión de datos ópticos (teléfono, televisión por cable, etcétera). Otras aplicaciones para los acopladores ópticos son los instrumentos de medida y la tecnología de sensores.

3.2 ACOPLADORES DE FUSIÓN

Los acopladores de fusión se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Todos los componentes de fibra tienen bajas pérdidas de inserción.
- Buen comportamiento en longitud de onda selectiva o banda ancha.
- Alta estabilidad térmica y mecánica.

3.3 PROCESO DE FABRICACIÓN

Los acopladores de fusión se fabrican por el método llamado FBT (Fused Biconical Taper), en el que las zonas de acoplamiento se crean por fusión y unificación simultánea de las fibras ópticas.

El material básico es una fibra monomodo con una capa protectora de acrilato (capa primaria, diámetro típico 250 μ m). Para producir un acoplador con dos salidas, lo primero de todo es pelar una pequeña porción de capa protectora de las dos fibras ópticas. Las zonas peladas son cuidadosamente limpiadas y alineadas en paralelo. El proceso posterior a la fusión y unificación simultánea permite el paso de la luz, o acoplarse, de un núcleo dentro del otro. Así, las dos fibras forman una única conexión de vidrio que no se interrumpe por la unión.

Los acopladores de fusión y módulos de acopladores con un gran número de puertos, se fabrican realmente como acopladores de fusión o módulos de acopladores. Los acopladores de fusión se fabrican por fusiones y unificaciones simultáneas de hasta 4 fibras (acoplador 1x4). Los módulos acopladores se forman con un alto número de acopladores simples.

Utilizando estos acopladores simples y cajas especialmente desarrolladas, se crea una estructura en cascada que proporciona módulos de acoplamiento de hasta 132 puertos.

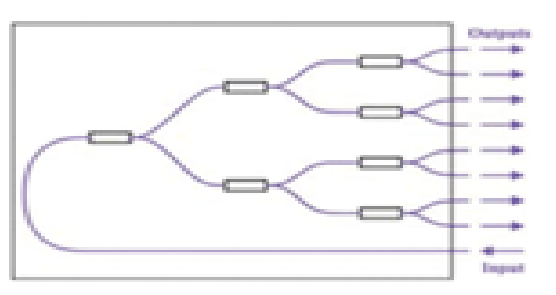


Figura 3. Diagrama de un acoplador 1x8.

3.4 CONCLUSIONES

A diferencia de los acopladores mencionados anteriormente, existe la posibilidad de realizar un diseño que acople una fuente de luz con fibras ópticas debido al efecto de difracción de la luz, en el cual, la posición del haz de luz difractado, se podrá calcular con exactitud por medio de la ecuación de red de la rejilla de difracción utilizada para colocar en ese lugar una fibra óptica, colocando en la posición exacta y teniendo conocimiento del ángulo al cual la fibra óptica puede aceptar al haz difractado, se lograra acoplar de manera eficiente la fuente de luz con la fibra, es decir, se puede buscar la mínima pérdida de señal eléctrica al entrar en la fibra.

El diseño experimental y sus componentes se mencionarán en los próximos capítulos, en los cuales también se mencionaran los métodos para calcular la señal eléctrica de entrada y salida al sistema y se estudiarán las causas posibles que puedan reducir la potencia de la luz al viajar dentro de la fibra.

4. DIFRACCIÓN DE LA LUZ Y PERSPECTIVAS DE SU UTILIZACIÓN EN LOS ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA.

4.1 INTRODUCCIÓN

La difracción de la luz ocurre si al encontrar un obstáculo transparente u opaco se altera la amplitud o la fase de una región del frente de onda. Los varios segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren, produciendo una distribución de densidad de energía particular denominada figura de difracción.

El principio de Huygens-Fresnel establece que cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de onda secundarios esféricos (de la misma frecuencia que la onda primaria). La amplitud del campo óptico en cualquier punto más allá es la superposición de todos estos trenes de onda.

4.2 DIFRACCIÓN DE FRAUNHOFER Y FRESNEL

Si se considera una pantalla opaca Σ , que contiene una sola abertura pequeña iluminada por ondas planas de una fuente puntual S , muy lejana y un plano de observación σ que es una pantalla paralela y muy cercana a Σ , entonces, bajo estas condiciones, se proyecta sobre la pantalla una imagen de la abertura que es reconocible a pesar de contar con unas pequeñas franjas que se ven alrededor de ella. Conforme el plano de observación va alejándose de Σ , la imagen de la abertura, va adquiriendo mas estructura mientras que las franjas se vuelven más prominentes. Este fenómeno se denomina difracción de Fresnel o de campo cercano.

Si ahora se considera que se va alejando mas el plano de observación, se producirá un cambio continuo en las franjas. A una gran distancia de Σ , la distribución proyectada habrá sufrido un cambio al extenderse considerablemente, teniendo muy poco parecido con la abertura real. De ahí en adelante, el movimiento de σ cambia solo el tamaño de la distribución y no su forma. Este fenómeno se denomina difracción de Fraunhofer o de campo lejano.

Como se obseva en la figura 4, siempre que la onda incidente y la emitida sean planas en la extensión de la abertura difractora, se obtiene la difracción de Fraunhofer. Por otro lado, cuando la fuente puntual o el plano de observación están demasiado cerca de la abertura, prevalece la difracción de Fresnel.

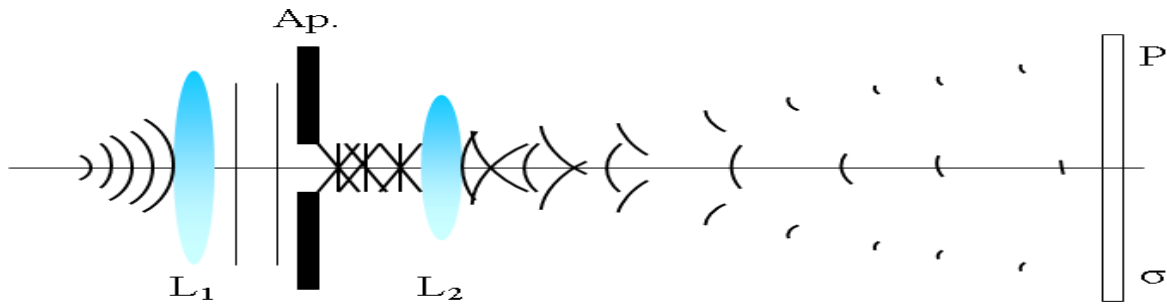


Figura 4. Difracción de Fraunhofer por una rendija

La difracción de Fraunhofer se producirá en una abertura (u obstáculo) con largo máximo a cuando

$$R > a^2 / \lambda$$

Donde R es la distancia más pequeña de las dos que van de S hasta Σ y de Σ hasta P. Un aumento de λ conduce al fenómeno al caso de Fraunhofer.

Consideremos ahora la figura 5 en donde se muestra un conjunto lineal de N osciladores puntuales coherentes, todos ellos idénticos. Todos los rayos que se muestran son paralelos, encontrándose en un punto P muy distante, las amplitudes de onda individuales que lleguen a P serán iguales, esto es

$$E_0(r_1) = E_0(r_2) = \dots = E_0(r_N) = E_0(r)$$

La suma de los trenes de onda esféricos interferentes produce un campo eléctrico en P proporcionado por la parte real de

$$\check{E} = E_0(r)e^{i(kr_1 - \omega t)} + E_0(r)e^{i(kr_2 - \omega t)} + \dots + E_0(r)e^{i(kr_N - \omega t)}$$

Lo anterior se puede escribir como

$$\check{E} = E_0(r)e^{-i\omega t} e^{ikr_1} \times [1 + e^{ik(r_2 - r_1)} + e^{ik(r_3 - r_1)} + \dots + e^{ik(r_N - r_1)}]$$

La diferencia de fase entre fuentes adyacentes se obtiene de la expresión $\delta = k_0\Lambda$, y puesto que $\Lambda = nd \sin\theta$, en un medio con índice n, $\delta = kd \sin\theta$. Se deduce que $\delta = k(r_2 - r_1)$, $2\delta = k(r_3 - r_1)$, etcétera. Entonces, el campo en P puede escribirse como

$$\check{E} = E_0(r) e^{-i\omega t} e^{ikr_1} \times [1 + (e^{i\delta}) + (e^{i\delta})^2 + (e^{i\delta})^3 + \dots + (e^{i\delta})^{N-1}]$$

Convirtiéndose en

$$\check{E} = E_0(r) e^{i(kR - \omega t)} \left(\frac{\text{sen } N\delta/2}{\text{sen } \delta/2} \right)$$

Donde $R = \frac{1}{2}(N-1) d \text{sen} \theta + r_1$

La distribución de densidad de flujo dentro de la distribución debida a N fuentes puntuales distantes, idénticas y coherentes en una disposición lineal, es proporcional a $EE^*/2$, donde E^* es E compleja, obteniéndose

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen}^2 (N\delta/2)}{\text{sen}^2 (\delta/2)} \right)$$

Donde I_0 es la densidad de flujo que saliendo desde cualquier fuente puntual llegue a P.

Los máximos principales se dan en direcciones θ_m , tales que $\delta = 2m\pi$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Si ahora suponemos una fuente lineal idealizada de osciladores electrónicos, como lo muestra la figura 6, en donde se muestran las fuentes secundarias para una rendija larga cuyo ancho es mucho menor que λ , iluminada por ondas planas. Cada punto emite ondas esféricas que pueden expresarse como

$$E = \left(\frac{\varepsilon_0}{r} \right) \text{sen} (\omega t - kr)$$

Donde ε_0 se denomina eficacia de la fuente.

Un segmento Δy_i del conjunto contendrá $\Delta y_i(N/D)$ fuentes, donde D es la longitud total del conjunto. Si suponemos que D está dividido en M de tales segmentos, es decir, i va de 1 a M. la contribución del segmento i a la intensidad del campo eléctrico en P es, por lo tanto

$$E_i = \left(\frac{\varepsilon_0}{r} \right) \text{sen} (\omega t - kr_i) \left(\frac{N\Delta y_i}{D} \right)$$

El campo neto en P de todos los segmentos M es

$$E = \sum_{i=1}^M \frac{\varepsilon_L}{r_i} \text{sen} (\omega t - kr_i) \Delta y_i$$

Como se está tratando una fuente lineal continua, Δy_i es infinitesimal ($M \rightarrow \infty$), transformándose la suma en una integral definida

$$E = \varepsilon_L \int_{-D/2}^{D/2} \frac{\text{sen}(\omega t - kr)}{r} dy$$

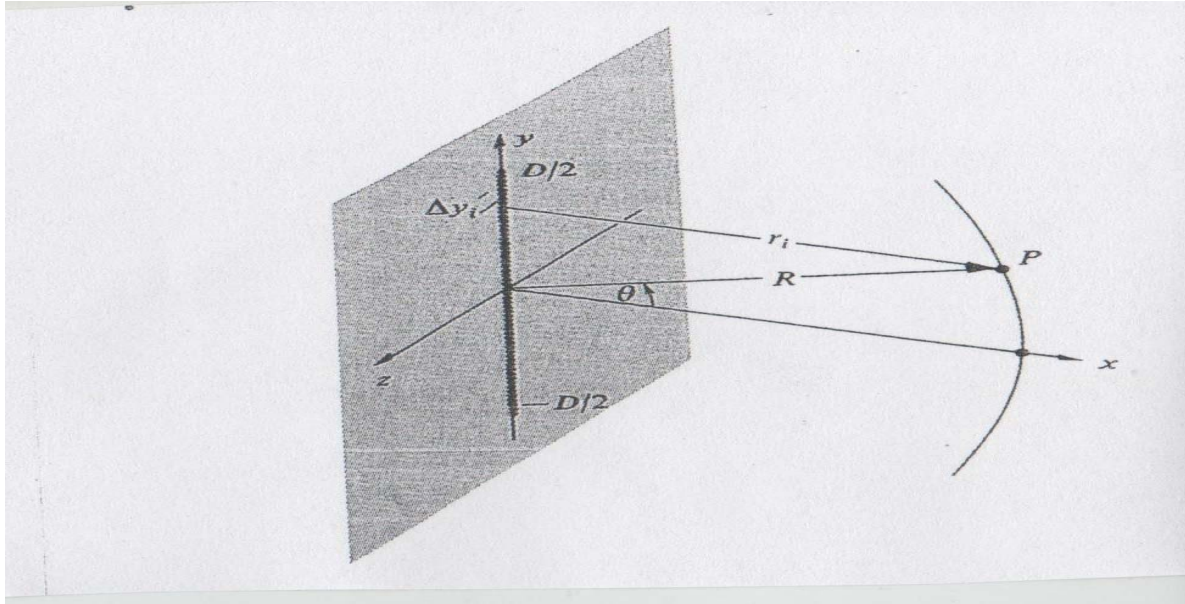


Figura 6. Fuente lineal coherente

Difracción de Fraunhofer por una rendija

Considerando un punto de observación P muy distante de la fuente coherente y $R \gg D$ en la figura 6, podemos expresar que el campo en P, debido al segmento diferencial dy de la fuente es

$$dE = \frac{\varepsilon_L}{R} \text{sen}(\omega t - kr) dy$$

Donde $\frac{\varepsilon_L}{R} dy$ es la amplitud de la onda. Desarrollando $r(y)$ como

$$r = R - y \text{sen} \theta + \frac{y^2}{2R} \cos^2 \theta + \dots$$

El tercer término puede ignorarse debido a que hablamos de distancias R grandes, con esto obtenemos la condición de Fraunhofer, en donde la distancia r es lineal en y, por lo tanto llegamos a que

$$E = \frac{\varepsilon_L}{R} D \frac{\text{sen}\left[\left(\frac{kD}{2}\right) \text{sen} \theta\right]}{\left(\frac{kD}{2}\right) \text{sen} \theta} \text{sen}(\omega t - kR)$$

Haciendo $\beta = (KD/2) \text{Sen} \theta$, entonces

$$E = \frac{\varepsilon_L}{R} D \left(\frac{\text{sen} \beta}{\beta}\right) \text{sen}(\omega t - kR)$$

Utilizando que $I(\theta) = \langle E^2 \rangle_T$, donde $I(\theta)$ es la irradiancia, y $\langle E^2 \rangle_T$ es el promedio temporal de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico al cuadrado, llegamos a que

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_L D}{R} \right)^2 \left(\frac{\text{sen} \beta}{\beta} \right)^2$$

Donde $\langle \text{sen}^2(\omega t - kR) \rangle_T = \frac{1}{2}$. Cuando $\theta = 0$, $\text{sen} \beta / \beta = 1$ e $I(\theta) = I(0)$, lo que corresponde al máximo principal. La irradiancia procedente de una fuente lineal coherente idealizada en la aproximación de Fraunhofer es

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\text{sen} \beta}{\beta} \right)^2$$

Utilizando la función sinc $\beta = \frac{\text{sen} \beta}{\beta}$, entonces

$$I(\theta) = I(0) \text{sinc}^2 \beta$$

Cuando $D \gg \lambda$, la irradiancia disminuye muy rápido conforme θ se desvía de cero, debido a que β se hace muy grande para valores grandes de la longitud D . por el contrario, cuando $\lambda \gg D$, β es pequeña, $\text{sen} \beta \approx \beta$, e $I(\theta) \approx I(0)$. La irradiancia es entonces constante para todo θ .

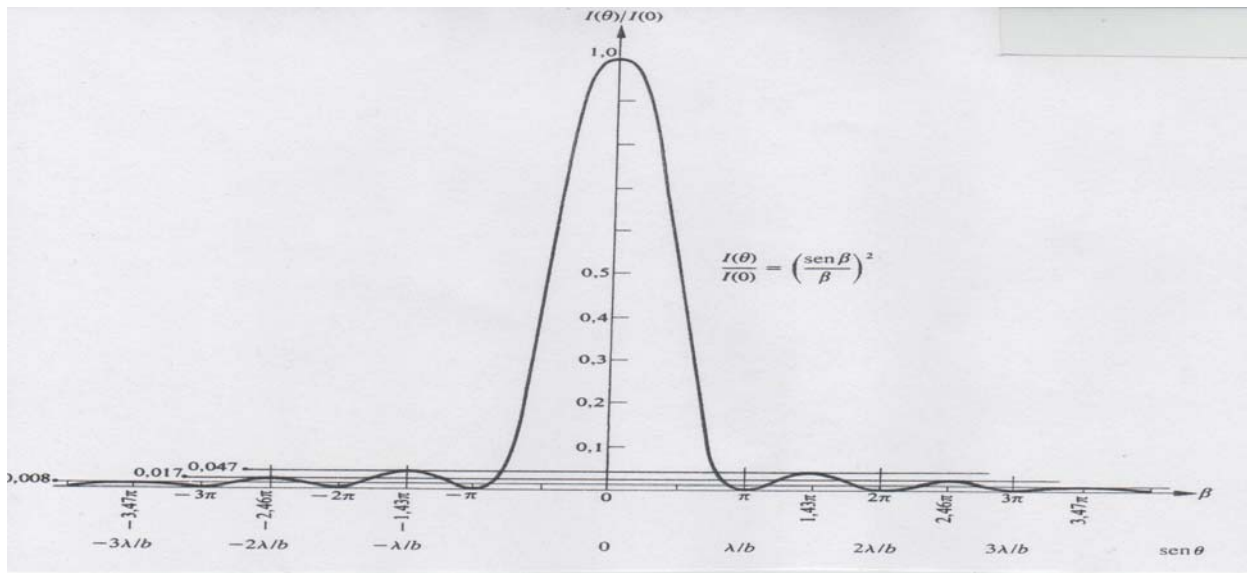


Figura 7. Distribución de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

Difracción de Fraunhofer por muchas rendijas

Considerando ahora el caso de N rendijas estrechas, largas y paralelas, cada una de ancho b y una separación a de centro a centro, como en la figura 8, con el origen del sistema coordinado en el centro de la primera rendija, se tiene que la perturbación óptica total en un punto en la pantalla esta dado por

$$E = C \int_{-b/2}^{b/2} F(z) dz + C \int_{a-b/2}^{a+b/2} F(z) dz + C \int_{2a-b/2}^{2a+b/2} F(z) dz + \dots + C \int_{(N-1)a-b/2}^{(N-1)a+b/2} F(z) dz$$

Donde $F(z) = \text{sen}[\omega t - k(R - z \text{sen}\theta)]$. El factor de amplitud constante C es la potencia original secundaria por unidad de longitud a lo largo del eje z dividida por R que se mide desde su origen hasta P y que se considera constante.

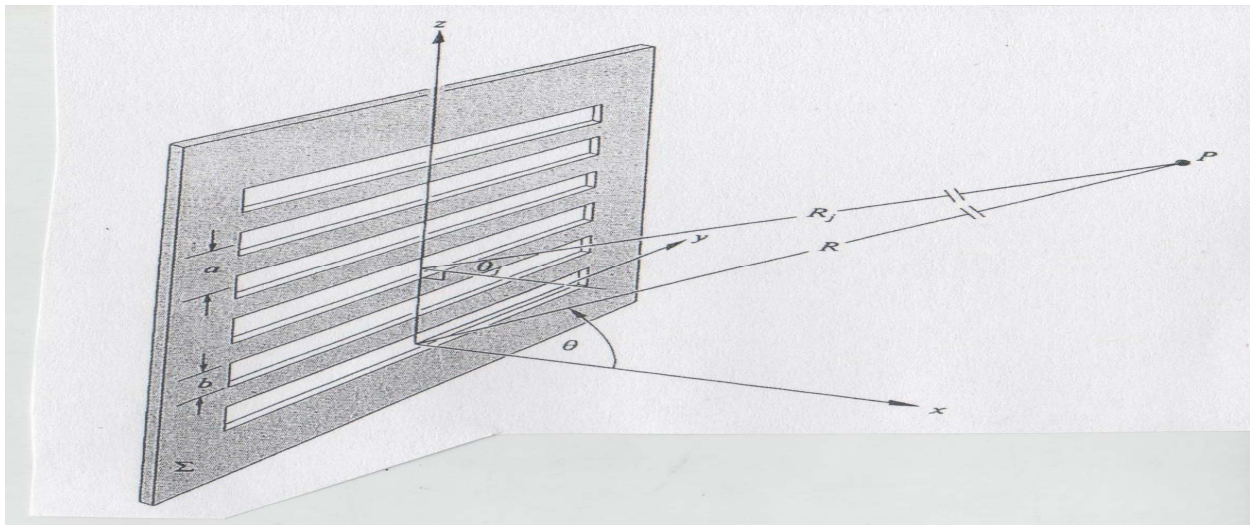


Figura 8. Rendijas múltiples, en donde el punto P se halla a una distancia infinita de Σ .

La magnitud de la intensidad de campo eléctrico total proporcionada por la suma de cada una de las rendijas está dada por¹

$$E = bC \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right) \left(\frac{\text{sen } N\alpha}{\text{sen}\alpha} \right) \text{sen}[\omega t - kR + (N - 1)\alpha]$$

La función de distribución de densidad de flujo es

¹ Consultar apéndice A

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2$$

I_0 es la densidad de flujo en la dirección $\theta = 0$ emitida por cualquiera de las rendijas e $I(0) = N^2 I_0$.

Los máximos principales se dan cuando $(\sin N\alpha / \sin \alpha) = N$, es decir, cuando $\alpha = 0, \pm\pi, \pm 2\pi, \dots$

Como $\alpha = (ka/2)\sin\theta$, entonces

$$a \sin \theta_m = m\lambda$$

Con $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

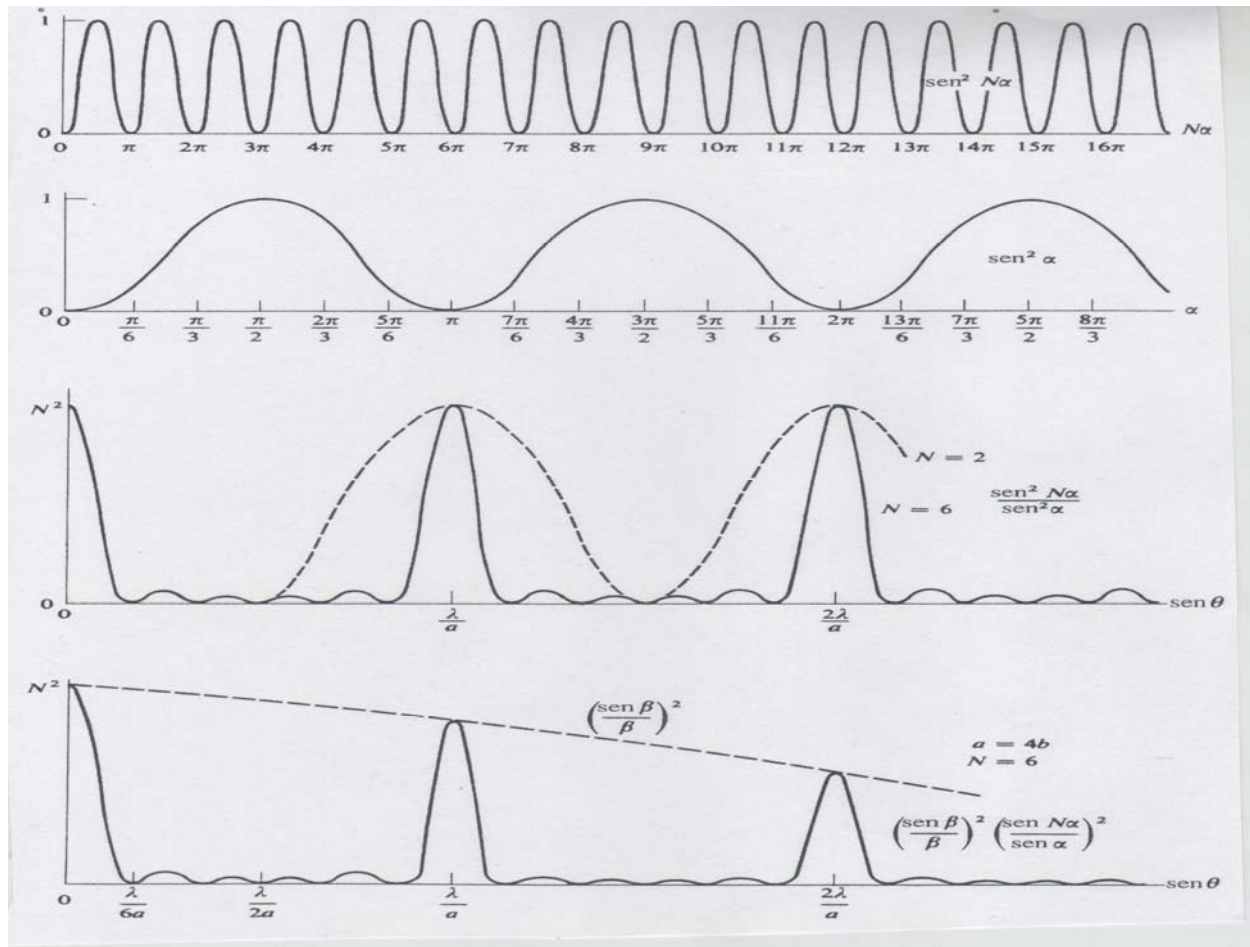


Figura 9. Difracción de rendijas múltiples.

4.3 TIPOS DE REDES DE DIFRACCIÓN

Una red de difracción es un conjunto repetitivo de elementos difractores de una onda, estos pueden ser aberturas u obstáculos, que tienen el efecto de producir alteraciones periódicas de fase, amplitud o ambas.

Red de transmisión de amplitud

Al hacer pasar un frente de onda a través de un sistema en donde se encuentren regiones opacas y transparentes alternadas, sufre una modulación en amplitud, una configuración múltiple de rendijas se denomina red de transmisión de amplitud.

Red de transmisión de fase

Cuando la red de difracción es totalmente transparente, de manera que la modulación en amplitud sea despreciable, las variaciones del espesor óptico a través del retículo dan una modulación en fase y se tiene lo que se denomina red de transmisión de fase. Se pueden visualizar los trenes de onda como radiados con diferentes fases sobre la superficie de la red.

Si la luz se refleja en la clase red anteriormente mencionada, la luz esparcida por las características periódicas de la superficie, llegan a un punto P con una relación definida. A este tipo de redes se les denomina red de reflexión de fase.

La ecuación obtenida en el análisis de la difracción de Fraunhofer por muchas rendijas:

$$a \sin \theta_m = m \lambda$$

Donde los valores de m especifican el orden de los diversos máximos principales, es denominada la ecuación de red para incidencia normal.

Considerando ahora incidencia oblicua, como se muestra en las figuras 10 y 11, la ecuación de red, tanto para transmisión como para reflexión, es:

$$a (\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m \lambda$$

Donde a es el espaciamiento de la estructura, θ_i el ángulo de incidencia y θ_m es la posición angular del orden de difracción medido. θ_i y θ_m se miden respecto a la normal al plano de la superficie difractante. Si $\theta_m = \theta_i$ corresponde al orden cero $m = 0$.

4.4 PROPUESTA ESQUEMÁTICA DE UN ACOPLADOR MULTIPUERTOS DE TIPO DIFRACTIVO.

Se propone el siguiente arreglo de acoplamiento entre una fuente láser y un arreglo de fibras ópticas multipuertos (1 x N) mostrado en la figura 10. Los haces del láser son difractados por una rejilla de difracción, que corresponde a un CD, con lo cual se obtienen múltiples haces, los cuales inciden dentro de las fibras ópticas. Se tienen medidores de potencia óptica de la señal de entrada y salida.

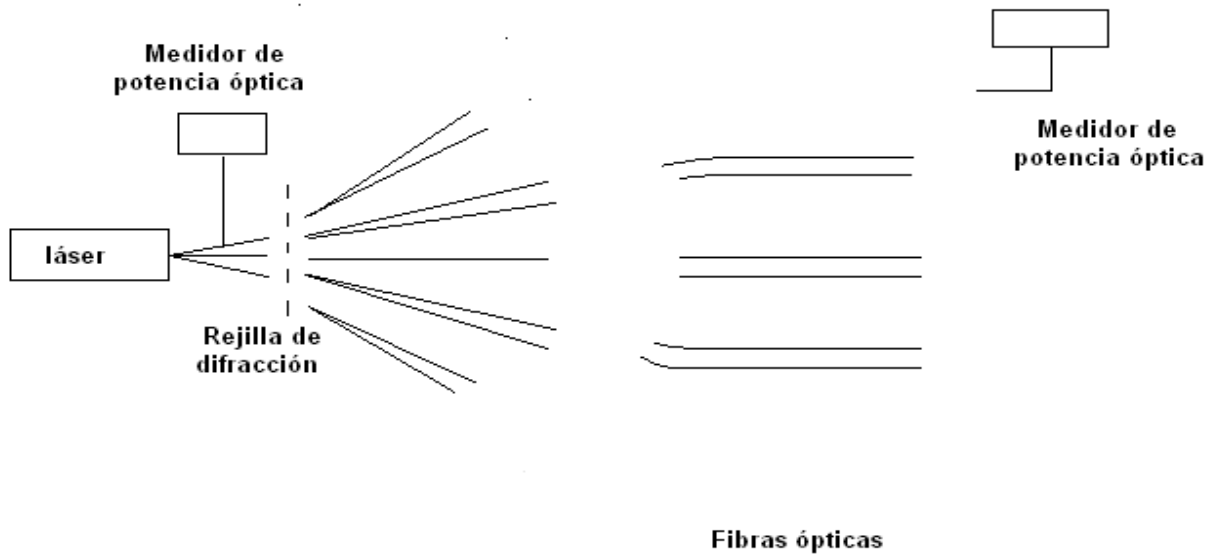


Figura 12. Diagrama de un acoplador multipuertos de tipo difractivo.

Diodo láser

En el experimento se propone la utilización de un diodo laser porque presenta la ventaja de que el proceso de emisión de luz en él tiene un volumen de generación menor y una alta concentración de portadores inyectados, con lo cual se produce una elevada ganancia óptica y un espectro de emisión muy estrecho.

La luz de este tipo de laser puede acoplarse fácilmente a una fibra óptica multimodo, acoplando la salida del haz laser con un extremo de la fibra.

Debido al patrón de radiación de la luz en un diodo laser, el cual es más directo que el patrón que presentan los LEDs, es más sencillo acoplar luz dentro de la fibra óptica. Esto reduce las pérdidas por acoplamiento y permite utilizar fibras de menor diámetro.

La potencia radiada de un diodo laser es generalmente de 5mW, mientras que el LED tiene una potencia de 0.5mW en promedio.

El láser genera luz monocromática, lo cual reduce la dispersión por longitud de onda en la fibra óptica.

Funcionamiento del láser Helio-Neón.

La emisión del laser He-Ne se realiza por medio de las colisiones que una descarga de electrones producida dentro del gas tiene con los átomos de helio.

Como resultado de estas colisiones, los átomos de helio son excitados a niveles superiores 2^1S y 2^3S .

La inversión de población en el neón ocurre debido a colisiones con átomos excitados de helio, como resultado de estas colisiones, los átomos de helio pasan a su estado base, y los átomos de neón pasan a los estados $3S$ y $2S$, creando una inversión de población entre estos estados y los estados $3p$ y $2p$. Entre estos niveles es donde la emisión láser puede ocurrir.

La realización de una transferencia de energía entre átomos de helio y neón ocurre debido al hecho de que los estados 2^1S y 2^3S del helio son meta estables, lo cual garantiza un tiempo suficientemente largo para colisionar con átomos de neón antes de que el helio decaiga espontáneamente. También ocurre debido a la más elevada presión del helio en la mezcla He-Ne, lo cual reduce la probabilidad de que la excitación ocurra en la dirección opuesta, es decir, Ne- \rightarrow He

El vaciado de los átomos de neón del estado meta estable $1s$ a su estado base ocurre fundamentalmente debido a colisiones con las paredes del tubo láser. Esto causa que al aumentar el diámetro del tubo la potencia de salida no aumente, si no que disminuye.

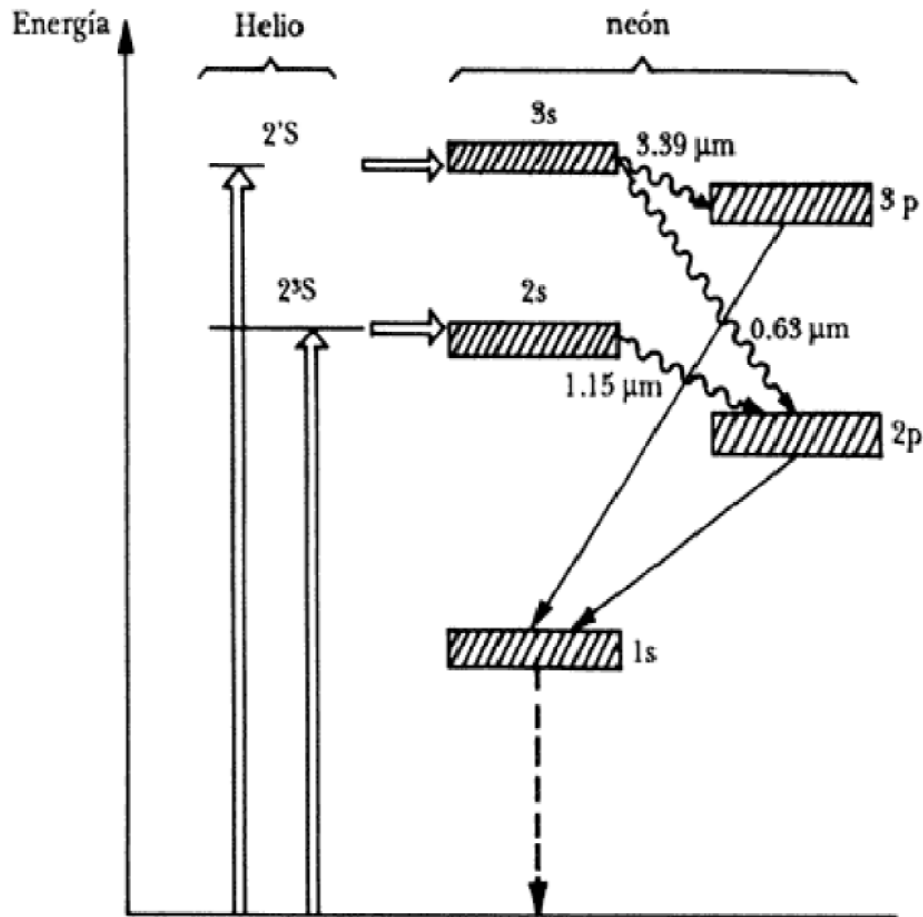


Figura 13. Diagrama de energía del laser He-Ne.

En el diagrama de energía del sistema He-Ne mostrado en la figura 11 se muestran las 3 transiciones láser más importantes, las cuales ocurren a $3.39\mu\text{m}$, $1.15\mu\text{m}$ y $0.638\mu\text{m}$. Se puede observar que los niveles 2^1S y 2^3S del Helio prácticamente coinciden con los niveles $3s$ y $2s$ del Neón. Los niveles $3s$ y $2s$ del neón poseen una vida media del orden de 10^{-7} segundos y pueden realizar transiciones radiactivas a los niveles $3p$ y $2p$. Estos últimos niveles poseen una vida media del orden de 10^{-8} segundos y por lo tanto se puede establecer una inversión de población entre estos y los niveles $3s$ y $2s$.

Aunque cada uno de los niveles $3s$, $2s$ y $1s$ se compone de cuatro subniveles y cada uno de los $3p$ y $2p$ de diez subniveles, las longitudes de onda de emisión predominante son para la transición $3s \rightarrow 3p$, $\lambda = 3.39\mu\text{m}$, para $3s \rightarrow 2s$, $\lambda = 0.6328$ y para $2s \rightarrow 2p$, $\lambda = 1.15\text{mm}$.

Utilización de un CD como red de difracción

La red de difracción se compone de muchas rendijas paralelas espaciadas con regularidad. Un CD presenta una espiral con resaltes y llanuras en aluminio reflectante, como se muestra en la siguiente figura.

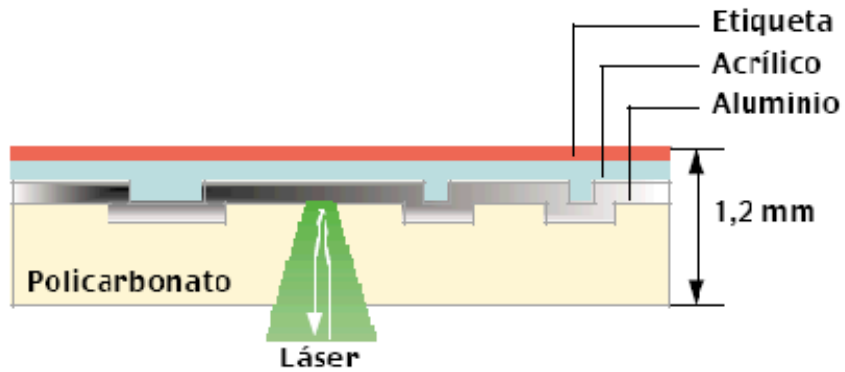


Figura 14. Esquema de los componentes de un CD.

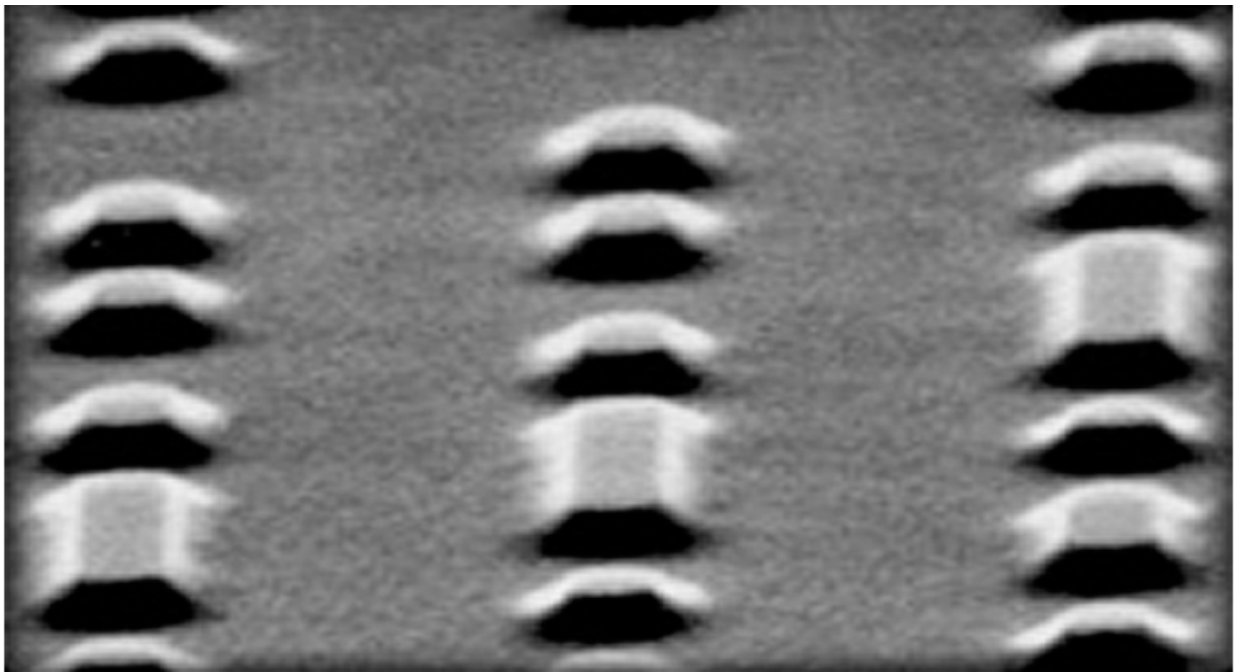


Figura 15. Resaltes y llanuras de un CD.

A continuación se muestra un esquema de ubicación del laser utilizado y la rejilla de difracción utilizada (CD).

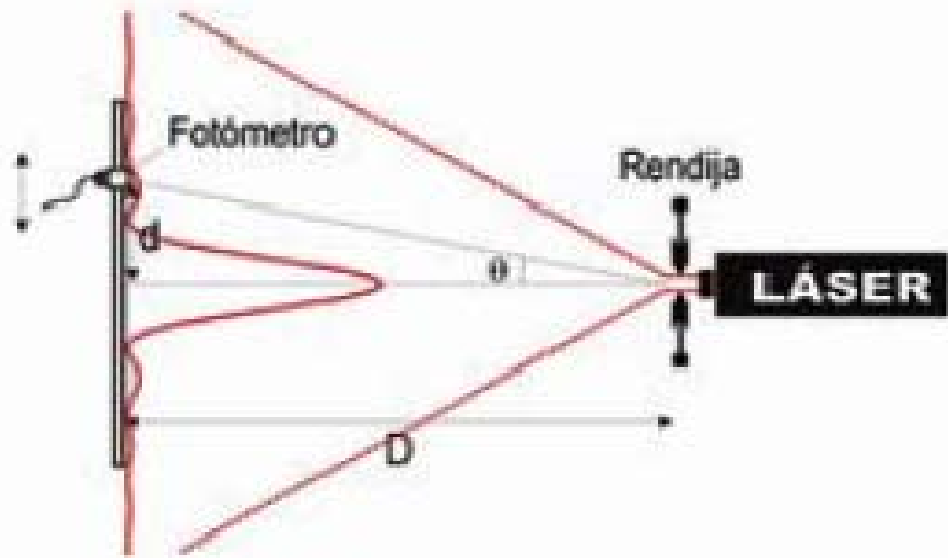


Figura 16. Montaje experimental del laser y la rendija de difraccion utilizados.

Denotando L como la distancia entre la fuente láser y la pantalla de observación, y d como la distancia entre el máximo de orden cero y el de primer orden, se tiene que

$$\text{Sen}\theta = \frac{d}{\sqrt{L^2+d^2}}$$

Y utilizando la ecuación de red para incidencia normal $b\text{sen}\theta_m = m\lambda$, llegamos a la siguiente relación

$$\lambda = \frac{d}{\sqrt{L^2+d^2}} b$$

Donde b es la distancia entre surcos en el CD^2 , la cual equivale a $0.001473 \pm 0.000052\text{mm}$, correspondiente a 678.518 ± 25 surcos por mm .

Fotodetectores

Un fotodetector convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica.

Algunos de los parámetros más importantes que caracterizan a los fotodetectores son los siguientes:

-Respuesta espectral: se relaciona con la cantidad de corriente producida con cada longitud de onda, asumiendo que todas las longitudes de onda tienen el mismo nivel de intensidad luminosa.

² Consultar apéndice B

-Fotosensitividad: es el cociente de la energía luminosa incidente en el dispositivo con la corriente resultante (en amperes).

-Eficiencia cuántica: es el número de pares de electrones-hueco generados (corriente) dividido por el número de fotones.

-Tiempo de tránsito: es el tiempo que le toma a una portadora de luz inducida recorrer el área de agotamiento del fotodiodo. Este parámetro determina la tasa de bits máxima a la cual el fotodiodo funciona correctamente.

-Respuesta espectral: este parámetro indica las longitudes de onda a las cuales el fotodiodo absorbe eficientemente energía de las señales luminosas recibidas.

Algunos de los fotodetectores existentes son los siguientes:

Fotodetectores PIN

Genera un solo par electrón-hueco por fotón absorbido. Son los más comunes y están formados por una capa de material semiconductor ligeramente dopado (región intrínseca), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, una tipo N y otra tipo P. Cuando se le aplica una polarización inversa al fotodetector, se crea una zona desértica (libre de portadores) en la región intrínseca en la cual se forma un campo eléctrico. Donde un fotón en la zona desértica con mayor energía o igual a la del material semiconductor, puede perder su energía y excitar a un electrón que se encuentra en la banda de valencia para que pase a la banda de conducción. Este proceso genera pares electrón – hueco que se les llama fotoportadores.

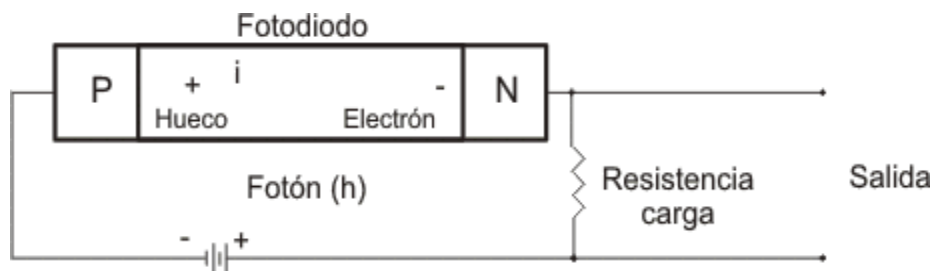


Figura 17. Diagrama de un fotodetector tipo PIN

Si se tiene un flujo Φ de fotones sobre el área del detector y cada fotón diera lugar a un electrón, se tendría una corriente igual a $e\Phi$, por lo cual, la potencia óptica incidente sería $P = \Phi hu$ y la intensidad sería $I = eP / hu$, entonces se tendría que:

$$I_{elec} = \eta \frac{eP}{h\nu} = RP$$

Donde R es llamada la responsividad, la cual tiene unidades de A/W y viene dada por:

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{\lambda_0(\mu m)}{1.24}$$

λ_0 es la longitud de onda de corte, $h = 6.626068 \times 10^{-34}$ (constante de Planck), ν es la frecuencia de los fotones (Hz). La responsividad se irá a cero cuando se llegue a la longitud de onda de corte, ya que no se absorberán fotones por el medio.

η se define como la eficiencia cuántica, la cual relaciona la probabilidad de que un fotón incidente sobre el dispositivo genere un par de portadores que contribuyen a la corriente del detector, en el próximo capítulo se abordará este concepto.

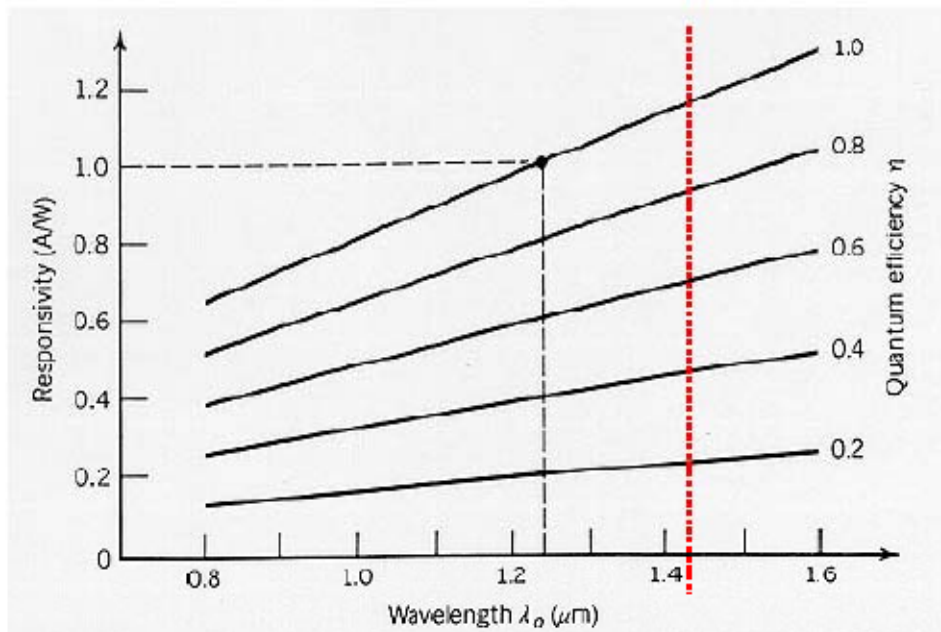


Figura 18. Grafica de la longitud de onda contra la responsividad y eficiencia cuántica de un fotodetector.

Fotodetectores de Avalancha APD

Presenta ganancia interna y genera más de un par electrón-hueco, debido al proceso de ionización de impacto llamado ganancia de avalancha. Cuando a un fotodetector se le aumenta el voltaje de polarización, llega un momento en que la corriente crece por el fenómeno de avalancha, si en esta región se controla el fenómeno de avalancha limitando la corriente (antes de la destrucción del dispositivo), la sensibilidad del fotodetector se incrementa.

Cuando se aplican altos voltajes de polarización, los portadores de carga libres se desplazan rápidamente, con mayor energía y liberan nuevos portadores secundarios, los cuales también son capaces de producir nuevos portadores. Este efecto se llama multiplicación por avalancha.

4.5 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se dio una breve referencia sobre los tipos de difracción existentes, lo cual tiene importancia para proponer un esquema de un acoplador multipuertos de tipo difractivo, el cual utilizara como red de difracción un CD con periodicidad del rango de la longitud de onda del láser He-Ne. Con la ecuación de red de difracción para incidencia normal

$$d \sin \theta_m = m \lambda$$

Se puede encontrar una relación entre los máximos principales m y el ángulo θ al cual se forman; en estos máximos se pretenden colocar fibras ópticas con el fin de formar un sistema que acople la fuente laser difractada con la fibra óptica.

En el experimento se propone la utilización de un diodo laser por la ventaja que presenta ante un LED sobre la elevada ganancia óptica que tiene en su espectro de emisión, además de tener un haz estrecho fácilmente acoplable con el diámetro de una fibra óptica multimodo.

Para convertir la luz inyectada desde el laser a la fibra óptica en corriente eléctrica se eligió utilizar un fotodetector PIN, el cual absorbe fotones dando lugar a un aumento en la conductividad del medio a través del efecto fotoeléctrico: absorción de fotones y generación de pares electrón-hueco. Este tipo de fotodetector presenta ventajas tales como: pequeña área de detección, bajo ruido, ancho de banda elevado y alta responsividad, la cual relaciona la corriente eléctrica generada con el número de fotones incidente en el detector.

5. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE LOS ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA DE TIPO REFRACTIVO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el esquema experimental del arreglo de fibras ópticas propuesto en el capítulo anterior, se busca obtener una mínima pérdida de señal del laser al salir de la fibra óptica, para poder hacer este análisis, se requiere introducir el tema de eficiencia energética del arreglo de acople entre la fuente laser y la fibra óptica, el cual relaciona la potencia óptica de salida y la de entrada, como se verá más adelante. La eficiencia oscila entre valores de 0 y 1, si la potencia del arreglo de salida es igual al de entrada, es decir, si no hubo pérdida en la señal, la eficiencia tomará un valor de 1, mientras que si la potencia de la señal de salida sufrió un decremento considerable con la potencia de entrada, la eficiencia tomara valores más bajos, acercándose a cero, mientras mayor sea la pérdida de señal.

La potencia óptica dentro de las fibras ópticas no es completamente uniforme, sino que puede sufrir una pérdida al transitar por la fibra óptica, a esta pérdida de potencia se le conoce como atenuación de la señal óptica y se debe a diversos factores, algunas de las causas que se mencionarán en este capítulo son:

- la absorción intrínseca de los átomos que constituyen a la fibra óptica
- el esparcimiento (scattering) debida a las inhomogeneidades en el índice de refracción, esta se puede entender como el esparcimiento parcial de un rayo de luz en muchas direcciones, provocando una disminución en la energía luminosa.
- atenuación debida a micro curvaturas causadas por el cableado de la fibra óptica.

La eficiencia de un acoplador de fibra óptica de tipo refractivo, está relacionada con el ángulo de incidencia del haz de luz en la fibra óptica, este ángulo depende de la apertura numérica de la fibra óptica, la cual describe la eficiencia de acoplamiento entre la fuente y la fibra, esta apertura numérica, como se mencionará, depende de los índices de refracción de los materiales del núcleo y revestimiento de la fibra óptica.

5.2 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN DETECTOR

Eficiencia ($0 \leq \eta \leq 1$)

Se define como la probabilidad de que un fotón incidente sobre el dispositivo genere un par de portadores que contribuyen a la corriente del detector. Dado que en general tendremos una elevada cantidad de fotones incidiendo sobre la superficie del detector, podemos escribir la eficiencia cuántica como

$$\eta = \frac{\text{flujo de electrones generado}}{\text{flujo de fotones incidente}}$$

No todos los fotones incidentes generan portadores que contribuyan a la fotocorriente, los efectos de reflexión en la superficie, transparencia del material a los fotones de energía inferior a la del *gap* de energía prohibida del mismo, la probabilidad de absorción cerca de la superficie del dispositivo y la rápida recombinación de portadores en este caso por la abundancia de defectos, hace que la eficiencia cuántica se reduzca.

5.3 ANÁLISIS DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA EN LAS FIBRAS DEL ARREGLO DE SALIDA

Atenuación de la señal

La atenuación de una señal ya sea acústica, eléctrica u óptica es la pérdida de potencia sufrida por la misma al transitar por cualquier medio de transmisión¹.

La atenuación, expresada en decibelios está dada por la siguiente fórmula:

En términos de potencia:

$$\alpha = 10 \times \log \frac{P_1}{P_2}$$

En términos de diferencias de potencial:

$$\alpha = 20 \times \log \frac{V_1}{V_2}$$

Donde P1 es la potencia la potencia de la señal eléctrica de entrada, P2 es la potencia de la señal eléctrica de salida, V1 es el voltaje de la señal eléctrica de entrada y V2 es el voltaje de la señal eléctrica de salida.

Existen diversas causas de atenuación en fibras ópticas, estas pueden ser la atenuación debida a la absorción intrínseca a los átomos que constituyen la fibra, la absorción por defectos atómicos en los centros de color y la absorción de impurezas extrínsecas. El otro factor que contribuye a la atenuación es la difusión o dispersión (scattering) debida a las inhomogeneidades en el índice de refracción y en la forma de la fibra.

¹ Consultar apéndice C

Las bandas de absorción intrínseca limitan las ventanas transparentes del material y establecen la región espectral de trabajo.

La absorción por impurezas crece, principalmente, debido a iones metálicos como hierro, cromo, cobalto, cobre y por iones OH- resultantes de las impurezas de agua.

La atenuación debida al scattering se atribuye, principalmente, a la dispersión de Rayleigh. Un rayo de luz se dispersa parcialmente en muchas direcciones y se pierde energía luminosa. La atenuación causada por este efecto decrece cuanto mayor es la longitud, siendo proporcional a $1/\lambda$. Su magnitud varía de un tipo de vidrio a otro, haciendo que en unos casos las pérdidas sean menores que en otros. Entre los 400 nm y 1100nm, la atenuación en la fibra se debe principalmente a la dispersión de Rayleigh.

Una fuente adicional de pérdidas en las fibras es la resultante de las micro curvaturas o micropliegues causados por el cableado de la fibra. Este tipo de pérdidas son producidas por el acoplamiento entre los modos guiados y por la radiación de los modos. Lo anteriormente expuesto indica que las pérdidas en las fibras no son necesariamente estáticas en su naturaleza (intrínsecas), sino que pueden ser afectadas por factores externos a las fibras. Una segunda causa externa de pérdidas puede atribuirse a la radiación existente en el entorno en que se encuentra la fibra. En general, fibras dopadas con silicio y de alta pureza tienden a ser más resistentes a la radiación que los compuestos de vidrios silicatados.

Apertura numérica

Las ondas luminosas deben entrar en la fibra dentro de cierto ángulo, llamado ángulo de aceptación. Este ángulo está definido por la apertura numérica NA. El concepto de apertura numérica es utilizado para describir la potencia colectora de luz de fibra y para calcular la eficiencia de acople fuente/fibra y está definido por:

$$NA = \text{sen}\alpha_{\text{máx}} = \sqrt{n_c^2 - n_r^2}$$

Donde $\alpha_{\text{máx}}$, representa el máximo ángulo de aceptación, n_c representa el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, y n_r el índice de refracción del revestimiento de la misma. Como se puede apreciar de la expresión anterior, la apertura numérica es función de los índices de refracción de los materiales de la fibra.

La apertura numérica NA de las fibras de índice gradual es una función que depende de la posición a lo largo del núcleo y no es una constante como el caso de una fibra de índice escalonado. Partiendo de la óptica geométrica se deduce que la luz incidente sobre el núcleo de la fibra en una posición r se propagará como un modo guiado, sólo si se encuentra dentro de la apertura numérica NA(r).

Una fibra de índice escalonado, tendrá el doble de modos que una fibra de índice gradual con igual radio.

Los valores típicos de apertura numérica que tienen las fibras multimodo de salto de índice se encuentran entre 0.2 y 0.5.

Capacidad de información y ancho de banda de las fibras

La capacidad de información de las fibras ópticas está limitada por la distorsión de la señal, que se manifiesta como ensanchamiento del pulso transmitido. Este ensanchamiento es un resultado de las características dispersivas del material de una fibra, de la estructura de las imperfecciones mecánicas dentro de la fibra, y de las discontinuidades inducidas de fatiga que pueden surgir en el proceso de cableado.

Un pulso de luz, a medida que viaja por la fibra, se va ensanchando. Este fenómeno se denomina dispersión del pulso y limita la cantidad de información que se puede transmitir.

Hay tres causas principales de dispersión en una fibra: efectos en la guía de onda, dispersión en el material y dispersión modal.

Dispersión de guía de onda

Esta causa de dispersión en una fibra óptica surge del hecho de que el número de modos V depende de la longitud de onda. La dispersión en la guía de onda para modos guiados en una fibra multimodo es sensiblemente pequeña para todos los modos alejados del corte (la longitud de corte es aquella a partir de la cual se transmite más de un modo). Ya que los modos próximos al corte, generalmente, transportan una fracción pequeña de la potencia total y suelen sufrir pérdidas más elevadas, la contribución a la dispersión por esta causa puede ser omitida.

Dispersión en el material

La dispersión en el material, denominada también dispersión intramodal, es particularmente significativa en las fibras monomodo. Este tipo de dispersión se debe al conjunto de longitudes de onda contenido en un pulso. Puesto que el índice de refracción varía con la longitud de onda, la velocidad de grupo v_g de un modo será función de la longitud de onda. Ya que las fuentes de luz tienen diferentes componentes en su espectro, cada una tardará distinto tiempo en la transmisión, debido a las diferentes velocidades a las que viajan, lo que producirá un ensanchamiento del pulso emitido.

La dispersión en el material es el principal factor inhibitor del uso de velocidades dentro del margen de 1Gbps y 2Gbps. Para lograr estas altas velocidades se requiere un laser que emita con un ancho de banda estrecho.

Dispersión modal

La dispersión modal, o dispersión intermodal, determina la capacidad de ancho de banda de las fibras multimodo. Las velocidades de grupo de los diferentes modos varían y conducen a un ensanchamiento del retardo de grupo o dispersión intermodal.

La mezcla de modos es un efecto debido a las imperfecciones estructurales, inhomogeneidades del índice de refracción, fluctuaciones en el diámetro y birrefringencia, y todo ello conduce a una ecualización de la velocidad modal. El acoplamiento modal reduce el ensanchamiento de las velocidades en la medida en que los modos acoplados tienden a poseer una velocidad promedio común de propagación. En las fibras de índice gradual, las velocidades modales están casi ecualizados.

Modos de propagación de las ondas en fibras ópticas

La luz que entra en la fibra óptica se propaga a través del núcleo en modos, que representan a los diferentes caminos posibles de las ondas luminosas.

La propagación de la luz a través de las fibras ópticas se describe mediante las ecuaciones de Maxwell, para explicar su propagación en fibras con simetría cilíndrica, se determinan los campos eléctrico y magnético de ondas guiadas que satisfacen las ecuaciones de Maxwell, con estas soluciones se determinan los modos de propagación de las ondas dentro de la fibra óptica

Cada componente de los campos eléctrico y magnético, debe satisfacer la ecuación de Helmholtz: $\nabla^2 U + n^2 k^2 U = 0$

Donde $n=n_1$ en el núcleo, $n=n_2$ en la cubierta, $k=2\pi / \lambda$ es el numero de onda de la luz en el vacío y λ es la longitud de onda. En el sistema de coordenadas cilíndricas, la ecuación de Helmholtz puede ser expresada como:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k^2 U = 0$$

Donde la amplitud compleja $U(r,\theta,z)$ representa a cualquiera de las componentes del campo electromagnético en coordenadas cilíndricas

La frecuencia normalizada, conocida como parámetro V , depende de la dimensión del núcleo de la fibra y los índices de refracción del núcleo y la cubierta. Los que determinan en mayor parte el numero de modos de propagación en la fibra.

$$V = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}$$

Donde a es el radio del núcleo de la fibra, λ representa la longitud de onda en el vacío, n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 es el índice de refracción del revestimiento. Para valores de la frecuencia normalizada entre 0 y 2.405 la fibra solo tiene un modo de propagación, mientras que para valores de V superiores a los 2.405 otros modos son posibles dentro de la fibra. Estos modos son doblemente degenerados. Degeneración que resulta del hecho que en las guías de ondas circulares, como la fibra óptica, todas las orientaciones son equivalentes, permitiendo la coexistencia de dos modos de polarización ortogonales con el mismo número de onda.

5.4 CONCLUSIONES

La eficiencia de acoplamiento entre la fuente laser y las fibras ópticas, depende en gran medida del nivel de atenuación que sufra la señal dentro de la fibra, esta pérdida de potencia sufrida al transitar por el medio, se puede caracterizar por la comparación entre el voltaje de la señal eléctrica de salida y el voltaje de la señal eléctrica de entrada, como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\alpha = 20 \times \log \frac{V_1}{V_2}$$

Conociendo los datos del voltaje eléctrico de la señal de entrada y de salida a la fibra óptica, se puede medir la atenuación de la señal eléctrica.

Otro factor tomado en cuenta para el análisis de la eficiencia de acople en el diseño experimental, es el ángulo al cual entra el haz de luz a la fibra óptica, comparando el ángulo que forma la fuente de luz con la fibra óptica, se puede observar si este cae dentro del ángulo máximo de aceptación de la fibra óptica para que la señal entrante se comporte como un modo guiado.

6. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrarán los resultados experimentales obtenidos acerca de los modos de propagación de la luz en la fibra óptica, la eficiencia de acoplamiento entre los haces difractados y las fibras ópticas, además de que se encontrará la atenuación de la señal óptica al viajar dentro de fibras sin revestimiento.

Se tomaron en cuenta dos fibras ópticas multimodo de índice escalonado. La primera de ellas cuenta con un índice de refracción en el núcleo de 1.48 y en el revestimiento de 1.419, el cálculo del ángulo de crítico correspondiente a esta fibra se realizó calculando el cociente entre el índice de refracción del revestimiento y el índice de refracción del núcleo, dando como resultado 0.9587, que corresponde a 73.5 grados, valor que se calculó al obtener la función inversa del seno a 0.9587. Para ángulos de incidencia mayores al ángulo crítico el rayo de luz incidente en la fibra óptica viajará dentro de la fibra haciendo reflexión total interna.

Para la obtención del ángulo al cual escapa un rayo de la fibra óptica, se utiliza la ley de Snell, teniendo el índice de refracción del núcleo de 1.48 y el índice de refracción del aire de 1.0, con lo que se obtiene un ángulo de 24.85 grados. La apertura numérica de esta fibra óptica corresponde a 0.42.

La segunda fibra óptica utilizada contaba con un índice de refracción en el núcleo de 1.49 y en el revestimiento de 1.409. El ángulo crítico correspondiente a esta fibra es de 71 grados. La apertura numérica de esta fibra es 0.48.

Analizando los rayos de luz que incidan en la primer fibra óptica mencionada, si uno de los rayos entra a un ángulo mayor al cono de aceptación de la primer fibra mencionada, el cual es de 24.85 grados, por ejemplo a 30 grados, por la ley de Snell, sabremos que el ángulo que forma el rayo con la normal dentro del núcleo de la fibra es de 19.74 grados. Ahora, tomando la normal entre el núcleo y el revestimiento, como se muestra en la figura 10, se observa que el ángulo entre el rayo y la normal es de 70.2 grados, el ángulo crítico entre el núcleo y el revestimiento es de 73.5 grados, por lo tanto, el ángulo incidente no podrá realizar reflexión total interna, por ser menor que el ángulo crítico, como resultado, este rayo penetrará en el revestimiento, como se muestra en la figura 17.

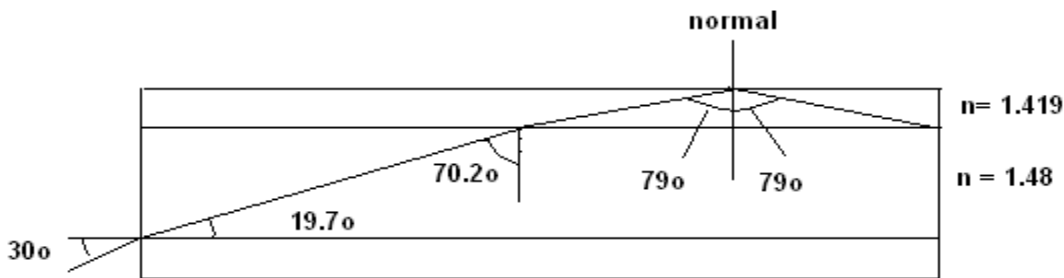


Figura 17. Trayectoria de un rayo de luz que incide en una fibra óptica multimodo de índice escalonado a un ángulo mayor al cono de aceptación.

Las dimensiones del núcleo de la fibra óptica determinan el número de modos de propagación dentro del núcleo. Los cuales se obtienen por la siguiente fórmula:

$$\text{Número de modos} = (\text{Diámetro del núcleo} \times \text{NA} \times \pi/\lambda)^2 / 2$$

La primera fibra óptica tomada en cuenta tiene un núcleo con diámetro de 368 micrómetros, el núcleo de la segunda fibra óptica tiene un diámetro de 200 micrómetros. El láser utilizado en ambas fibras tiene una longitud de onda de 632.8 nanómetros.

El número de modos de la fibra óptica con diámetro del núcleo de 368 micrómetros es de 294395, mientras que el número de modos de la fibra con diámetro del núcleo de 200 micrómetros es de 113574.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para medir la eficiencia de acoplamiento entre un laser y un arreglo de fibras ópticas, se utilizó un laser Helio Neón de longitud de onda de 632.8 nm, la luz emitida por el laser fue difractada por un CD que se utilizó como rejilla de difracción por transmisión. Al incidir la luz del láser sobre la superficie del CD se observaron por transmisión los máximos principales correspondientes a la red de difracción. Se colocó una pantalla al otro lado de la red, observándose sobre ella una serie de franjas claras y oscuras alternadas, el CD contaba con una separación de 0.0016 ± 0.000061 mm entre surcos. Se colocaron fibras ópticas en las posiciones de los máximos principales mostrados por los haces difractados. Antes de que el rayo incidiera en cada fibra óptica, se midió su diferencia de potencial, también se hizo lo mismo con los

rayos al salir de las fibras ópticas, logrando hacer una comparación entre la potencia óptica de la señal de entrada y la de salida a cada fibra.

Como se mostró anteriormente, la medición de la potencia óptica de salida de cada fibra óptica, corresponde a los modos tanto del núcleo de la fibra como a los del revestimiento.

Para poder medir la potencia óptica de los modos correspondientes únicamente al núcleo de la fibra, se aplicó la técnica llamada mode stripper¹, desprendiendo el revestimiento de la fibra óptica, y colocándola en un medio con un índice de refracción ligeramente mayor al índice de refracción del revestimiento, eliminando así los modos de revestimiento de la fibra.

Se utilizó glicerina como medio para eliminar los modos del revestimiento de la fibra, la glicerina tiene un índice de refracción de 1.47, mientras que el índice de refracción del revestimiento de las fibras ópticas utilizadas fue de 1.419 y 1.409 respectivamente. En la figura 12 se muestra el arreglo experimental utilizado para medir la potencia óptica de la señal de entrada y de salida correspondiente a los modos de cada fibra óptica. En la figura 13 se muestra el diagrama del arreglo experimental que se utilizó para medir la potencia óptica de la señal de entrada y salida en cada fibra sin su revestimiento, es decir, una vez realizado el mode stripper.

Posteriormente se realizó la medición de potencia óptica de la señal de entrada y de salida a las fibras sin revestimiento y utilizando aire en lugar de glicerina.

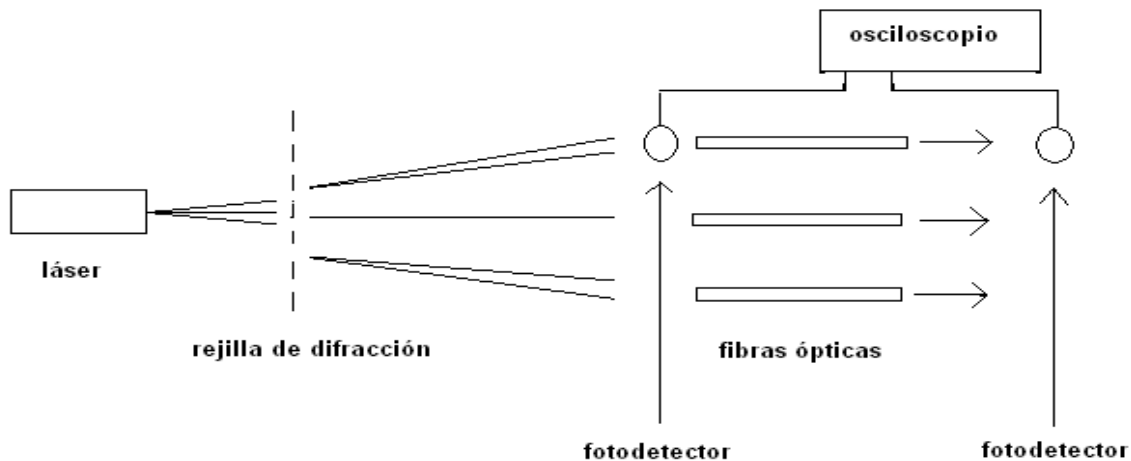


Fig. 20. Diagrama del montaje experimental para medir la potencia óptica de la señal de entrada y salida en las fibras ópticas con revestimiento.

¹ Consultar apéndice D

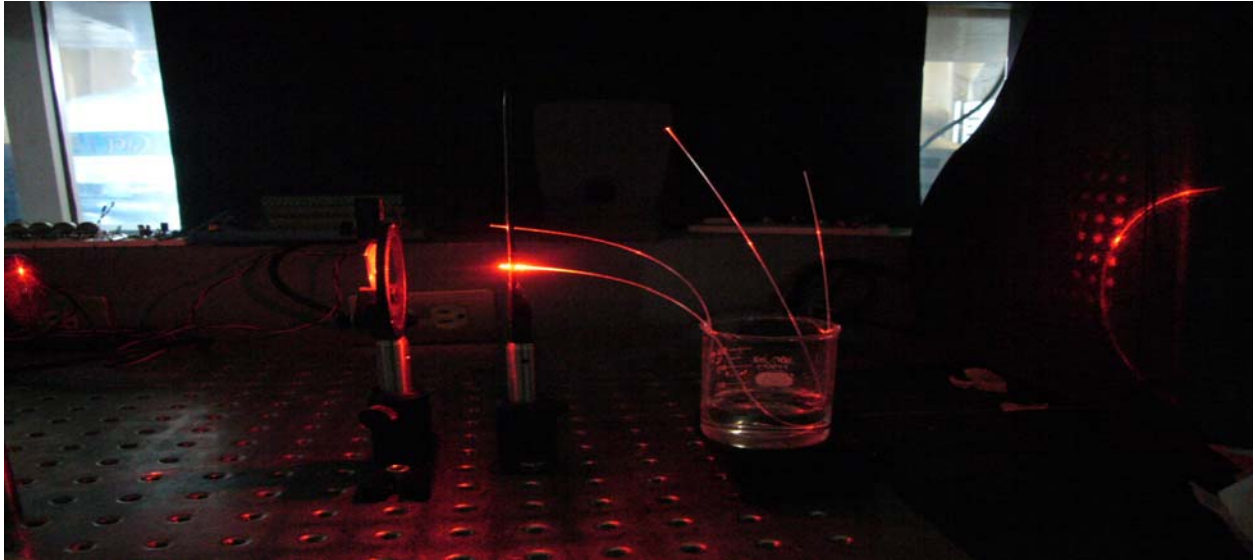


Figura 21. Diagrama del montaje experimental utilizado para medir la potencia óptica de la señal de entrada y salida en las fibras sin revestimiento, estas se colocaron en glicerina.

Los voltajes obtenidos para las señales de entrada y salida en las fibras ópticas con y sin revestimiento fueron los siguientes:

Para la fibra óptica con índices de refracción de núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente:

Tabla 1. Voltaje de la señal de entrada y de salida para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	5.50
	6.00	5.75
	6.00	5.50
	6.00	5.25
	6.00	5.25
promedio	6.00	5.45
Máximo de orden 1	5.00	4.25
	5.00	4.50
	5.00	4.00
	5.00	4.50
	5.00	4.75
promedio	5.00	4.40
Máximo de orden -1	5.00	4.50
	5.00	4.25
	5.00	4.25
	5.00	4.75
	5.00	4.50
promedio	5.00	4.45

Tabla 2. Voltaje de la señal de entrada y de salida para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	5.00
	6.00	5.75
	6.00	5.50
	6.00	5.50
	6.00	5.50
promedio	6.00	5.45
Máximo de orden 1	5.00	4.50
	5.00	4.00
	5.00	4.50
	5.00	4.00
	5.00	4.50
promedio	5.00	4.30
Máximo de orden -1	5.00	4.00
	5.00	4.25
	5.00	4.25
	5.00	4.50
	5.00	4.25
promedio	5.00	4.25

Los datos obtenidos del voltaje en la señal de entrada y salida para las fibras ópticas sin revestimiento y sumergidas en glicerina son los siguientes:

Tabla 3. Voltaje de la señal de entrada y de salida de los modos correspondientes al núcleo para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente colocada en glicerina.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	5.00
	6.00	5.25
	6.00	4.75
	6.00	5.00
	6.00	5.00
promedio	6.00	5.00
Máximo de orden 1	5.00	3.75
	5.00	4.00
	5.00	4.50
	5.00	4.25
	5.00	3.50
promedio	5.00	4.00
Máximo de orden -1	5.00	4.00
	5.00	4.25
	5.00	3.50
	5.00	3.75
	5.00	4.00
promedio	5.00	3.90

Tabla 4. Voltaje de la señal de entrada y de salida de los modos correspondientes al núcleo para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente colocada en glicerina.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	5.00
	6.00	5.00
	6.00	5.00
	6.00	4.75
	6.00	4.75
promedio	6.00	4.90
Máximo de orden 1	5.00	3.50
	5.00	3.75
	5.00	4.25
	5.00	4.25
	5.00	3.25
promedio	5.00	3.8
Máximo de orden -1	5.00	4.00
	5.00	4.50
	5.00	3.00
	5.00	3.50
	5.00	4.00
promedio	5.00	3.80

Los datos obtenidos del voltaje en la señal de entrada y salida para las fibras ópticas sin revestimiento y colocadas en aire son los siguientes.

Tabla 5. Voltaje de la señal de entrada y de salida de los modos correspondientes al núcleo para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente colocada en aire.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	4.75
	6.00	5.00
	6.00	4.50
	6.00	4.50
	6.00	4.90
promedio	6.00	4.73
Máximo de orden 1	5.00	3.50
	5.00	3.50
	5.00	4.25
	5.00	4.00
	5.00	3.25
promedio	5.00	3.7
Máximo de orden -1	5.00	4.25
	5.00	4.50
	5.00	3.00
	5.00	3.25
	5.00	4.50
promedio	5.00	3.90

Tabla 6. Voltaje de la señal de entrada y de salida de los modos correspondientes al núcleo para una fibra óptica con índice de refracción en núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente colocada en aire.

	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)
Máximo de orden cero	6.00	5.00
	6.00	5.00
	6.00	4.25
	6.00	4.50
	6.00	5.00
promedio	6.00	4.75
Máximo de orden 1	5.00	3.50
	5.00	4.00
	5.00	4.50
	5.00	4.00
	5.00	3.50
promedio	5.00	3.9
Máximo de orden -1	5.00	4.50
	5.00	4.00
	5.00	3.50
	5.00	3.25
	5.00	4.50
promedio	5.00	3.95

En todas las pruebas obtenidas, se obtuvo un máximo de intensidad en el orden cero, esto se explica por el hecho de que todos los focos secundarios que forma la rejilla de difracción utilizada son equidistantes y las ondas secundarias que originan llegan en fase. Conforme nos alejamos del orden cero, la intensidad del haz se va atenuando debido a que hay desfases en las ondas secundarias.

La intensidad de la luz difractada según la dirección dada por un ángulo θ con la dirección perpendicular a la rejilla y la pantalla está dada por:

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\text{sen } \beta}{\beta} \right)^2$$

Ecuación vista en el capítulo 4, en donde se analizó el caso de la difracción de Fraunhofer para la rendija única.

Donde

$$\beta = (KD/2) \text{ Sen } \theta$$

La distribución de intensidades resultante del arreglo experimental fue la mostrada en la figura 22.

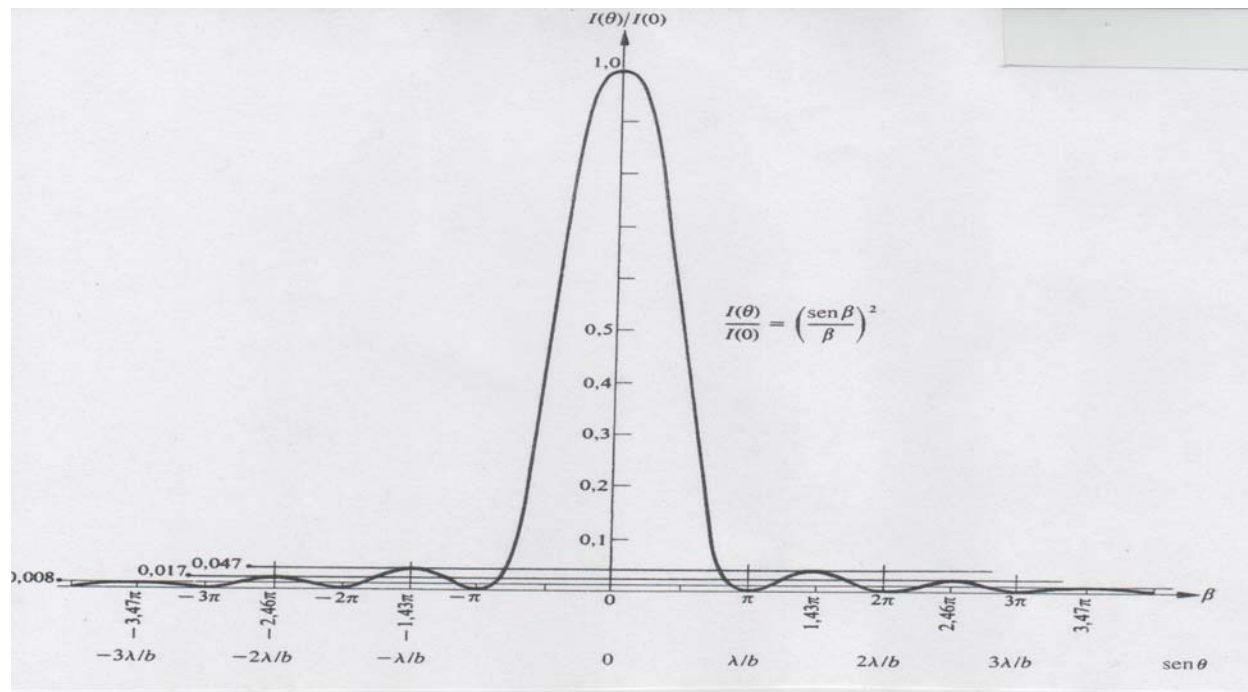


Figura 22. Distribución de difracción resultante de la instalación experimental.

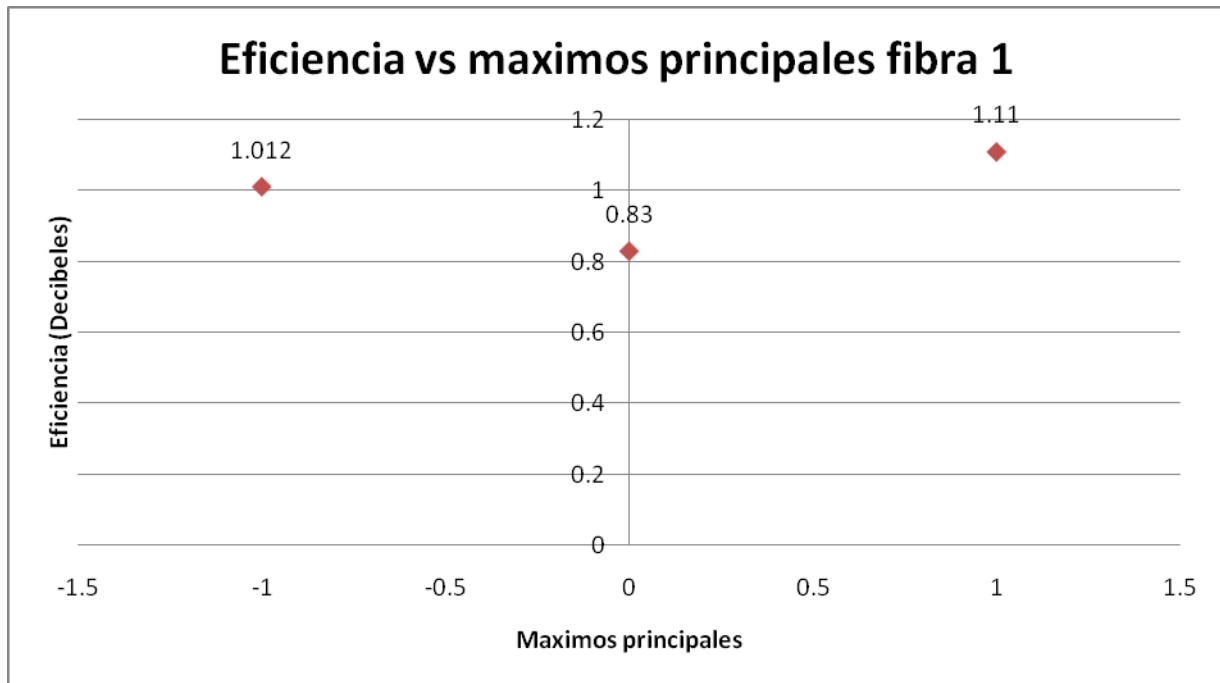
6.3 CARACTERIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ACOPLAMIENTO

Midiendo la atenuación de la señal al pasar a través de las fibras ópticas, podremos conocer la eficiencia de acoplamiento entre los rayos difractados y las fibras ópticas, recordando que la eficiencia de acoplamiento está definida por la ecuación

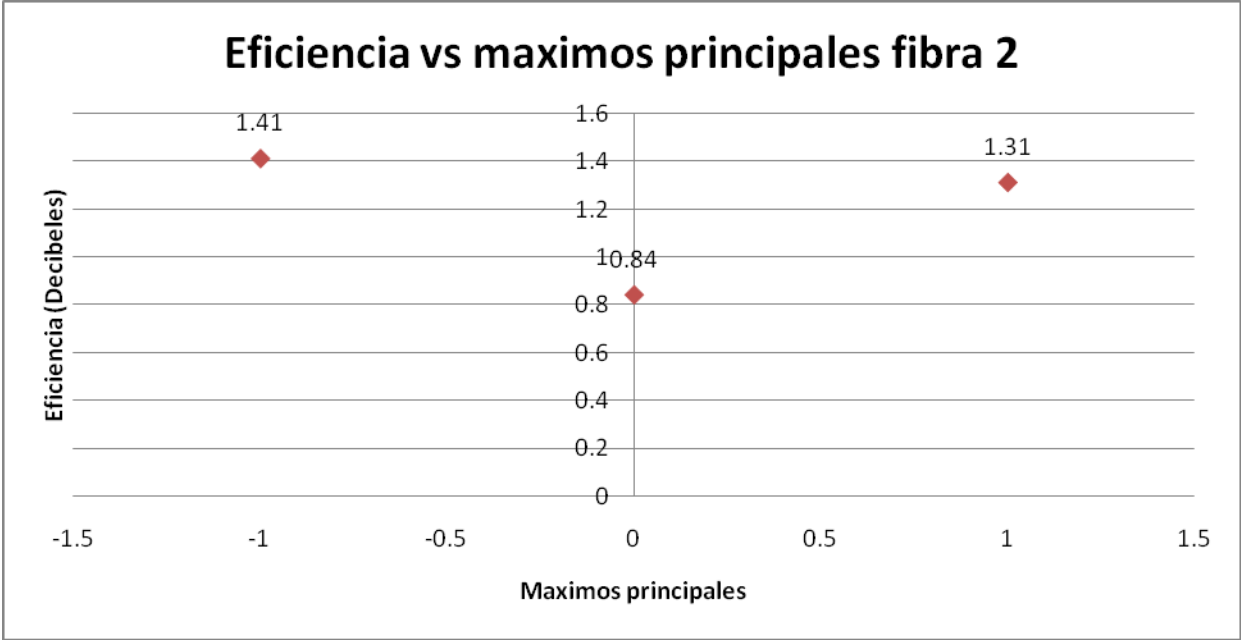
$$\eta = P_2 / P_1$$

Donde P_1 es la potencia de la señal eléctrica de entrada y P_2 es la potencia de la señal eléctrica de salida.

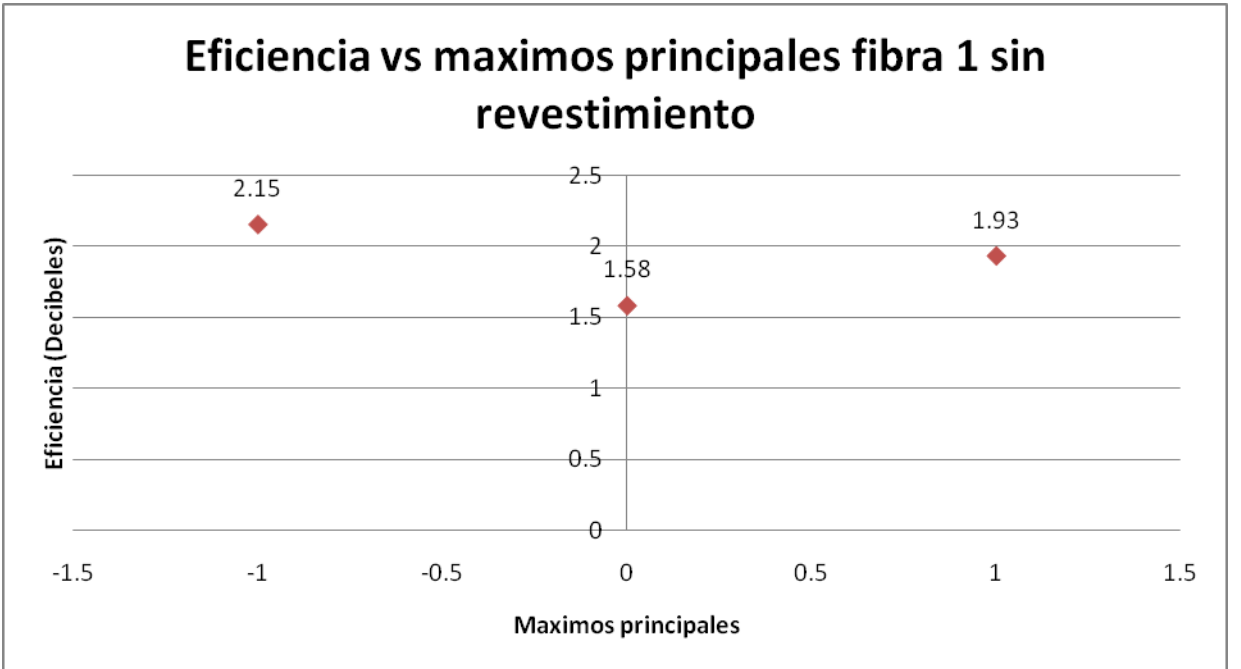
A continuación se muestran gráficamente los valores absolutos de las eficiencias de acoplamiento sufridas por la señal al entrar en cada fibra óptica con y sin revestimiento.



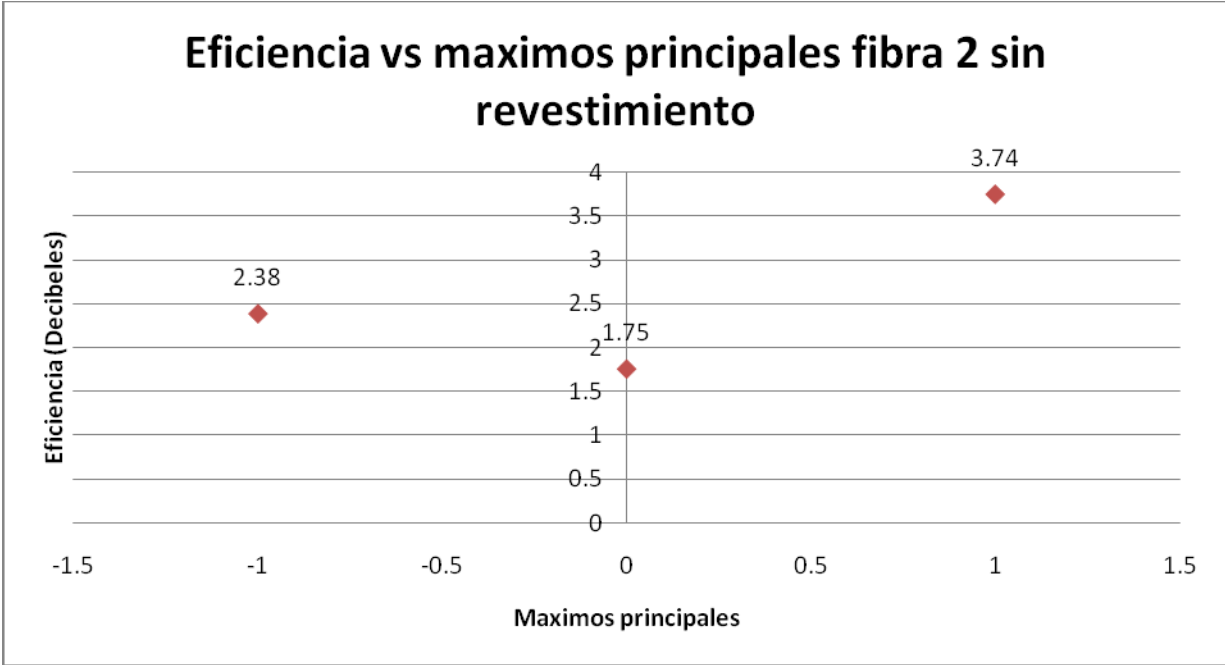
Grafica 1. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica con índice de refracción de núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente.



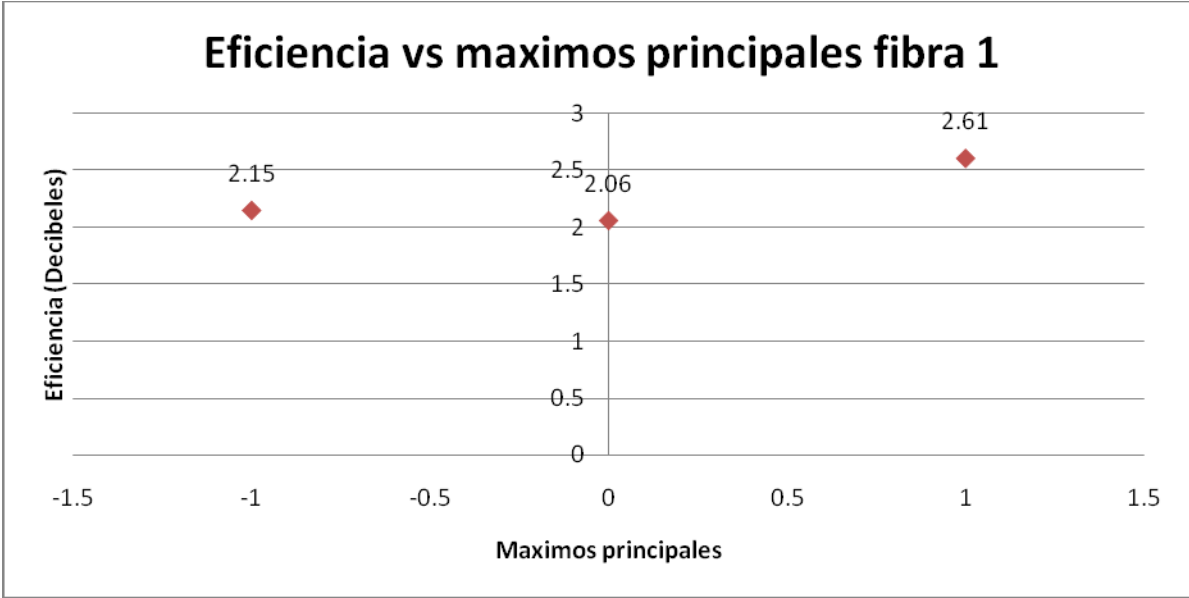
Grafica 2. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica con índice de refracción de núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente.



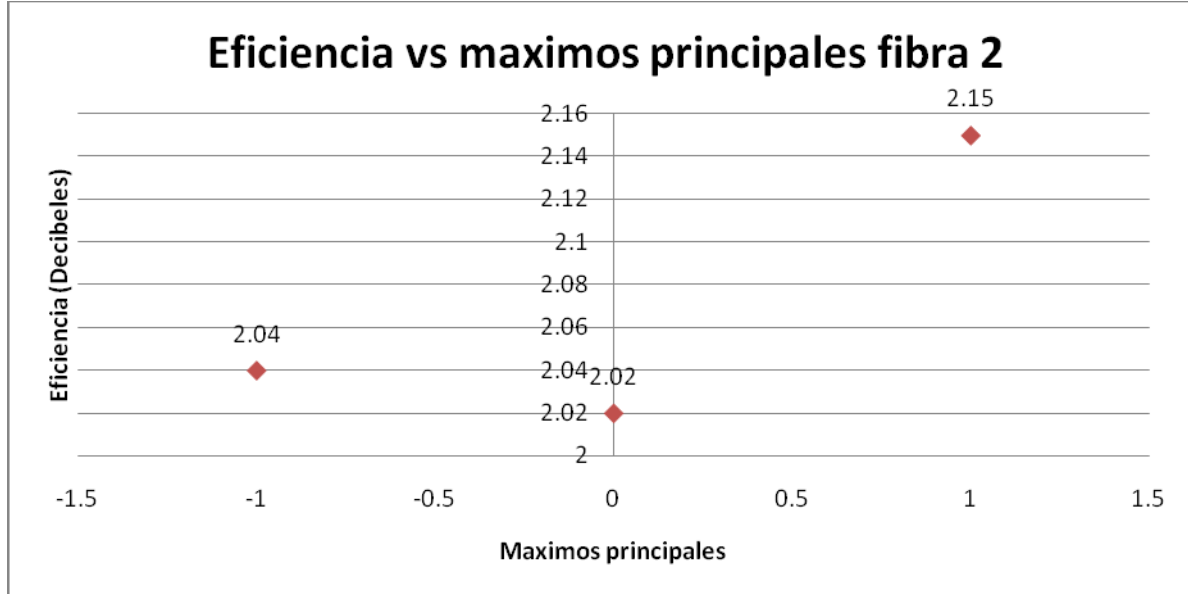
Grafica 3. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.48 puesta en glicerina.



Grafica 4. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.49 puesta en glicerina.



Grafica 5. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.48 colocada en aire.



Grafica 6. Eficiencia de acoplamiento entre la señal óptica y la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.49 colocada en aire.

6.4 CONCLUSIONES

Se encontró que el número de modos de propagación es mayor en la fibra óptica con índices de refracción en núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente, el cual fue de 294395 modos, mientras que para la fibra óptica con índices de refracción en núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente fue de 113574, lo cual se explica por el producto entre diámetro del núcleo de la fibra y su apertura numérica, el cual determina el número de modos de propagación.

La eficiencia de acoplamiento entre la fuente láser y el arreglo de salida fue mayor para la fibra que tiene un diámetro de 368 micrómetros que para la que tiene un diámetro de 200 micrómetros.

Al realizar el mode stripper a las fibras ópticas, se pudieron eliminar los modos de revestimiento de éstas, con lo cual se midió únicamente la potencia de salida de la señal óptica en el núcleo de cada fibra.

Se encontró que la distribución de densidad de flujo en la distribución de difracción debida al CD corresponde a la irradiancia procedente de una fuente lineal coherente idealizada de Fraunhofer.

7. CONCLUSIONES GENERALES

1. Se investigó el estado actual de las aplicaciones de las fibras ópticas, con un enfoque sobre los sensores ópticos de diferentes cantidades físicas y se identificaron los campos de mayor perspectiva tales como la telemedicina. También se identificaron algunos problemas clave en la implementación de nuevos sensores en fibras.
2. Se identificó que entre los problemas relacionados al desarrollo e implementación de los sistemas o redes de sensores múltiples se encuentra el problema de los acopladores multipuertos de fibras ópticas que en su mayoría son de tipo fijo sin posibilidades de variar el número de puertos de salida.
3. Se propuso un nuevo tipo de acoplador entre una fuente láser y múltiples fibras ópticas basado en el efecto de difracción de la luz.
4. Se realizó un análisis teórico de las características de este nuevo acoplador y se encontraron sus características principales.
5. Se desarrolló el procedimiento de la caracterización experimental de un acoplador de tipo difractivo, se diseñó el experimento correspondiente y se implementó la instalación para la realización de las pruebas de funcionamiento de un acoplador difractivo.
6. Se investigaron experimentalmente las características principales de una maqueta funcional del acoplador difractivo basado en una rejilla de difracción por transmisión.
7. Se obtuvieron los datos sobre la eficiencia de acoplamiento de luz de una fuente láser de He-Ne a varias fibras ópticas multimodo de plástico. Se obtuvo la

eficiencia de acoplamiento promedio de 0.98 decibeles para la fibra óptica con índice de refracción de núcleo y revestimiento de 1.48 y 1.419 respectivamente; una eficiencia promedio de 1.186 decibeles para la fibra óptica con índice de refracción de núcleo y revestimiento de 1.49 y 1.409 respectivamente; una eficiencia promedio de 1.86 decibeles para la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.48 puesta en glicerina y una eficiencia promedio de 2.62 decibeles para la fibra óptica sin revestimiento con índice de refracción de núcleo de 1.49 puesta en glicerina.

8. Con todo lo anterior, se demostró la factibilidad de utilización del efecto de difracción de la luz para la implementación de los acopladores multipuertos en su aplicación en los sistemas de fibra óptica con aplicaciones potenciales en sistemas de sensores ópticos.

8. APÉNDICES

8.1 APÉNDICE A

Difracción de Fraunhofer por muchas rendijas

La perturbación óptica total en un punto en la pantalla esta proporcionada por

$$E = C \int_{-b/2}^{b/2} F(z) dz + C \int_{a-b/2}^{a+b/2} F(z) dz + C \int_{2a-b/2}^{2a+b/2} F(z) dz + \dots + C \int_{(N-1)a-b/2}^{(N-1)a+b/2} F(z) dz$$

Donde tenemos que $F(z) = \text{sen}[\omega t - k(R - z \text{sen}\theta)]$. Haciendo la aproximación $r = R - z \text{sen}\theta$, la contribución de la rendija j -esima será entonces

$$E_j = \frac{C}{k \text{sen}\theta} [\text{sen}(\omega t - kR) \text{sen}(kz \text{sen}\theta) - \cos(\omega t - kR) \cos(kz \text{sen}\theta)]^{j a + b/2}_{j a - b/2}$$

Teniéndose

$$E_j = bC \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right) \text{sen}(\omega t - kR + 2\alpha j)$$

Donde $\beta = (kb/2) \text{sen}\theta$ y $\alpha = (ka/2) \text{sen}\theta$

La perturbación óptica total en un punto en la pantalla es la suma de las contribuciones de cada una de las rendijas, es decir,

$$E = \sum_{j=0}^{N-1} bC \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right) \text{sen}(\omega t - kR + 2\alpha j)$$

Esto puede escribirse como la parte imaginaria de una exponencial compleja

$$E = \text{Im} \left[bC \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right) e^{i(\omega t - kR)} \sum_{j=0}^{N-1} e^{i2\alpha j} \right]$$

Reduciéndose a la ecuación

$$E = bC \left(\frac{\text{sen}\beta}{\beta} \right) \left(\frac{\text{sen } N\alpha}{\text{sen } \alpha} \right) \text{sen}[\omega t - kR + (N-1)\alpha]$$

8.2 APÉNDICE B

Determinación del número de surcos por milímetro en un CD

Para determinar el número de surcos de un CD en un milímetro, se hizo incidir normalmente luz de un laser de longitud de onda $\lambda = 632.8$ nm sobre un CD desprovisto de su capa reflectante, con esto, se pudo observar claramente en una pantalla el máximo de orden cero y el de orden 1, midiéndose la distancia d entre ellos, utilizando la ecuación

$$\lambda = \frac{d}{\sqrt{L^2 + d^2}} b$$

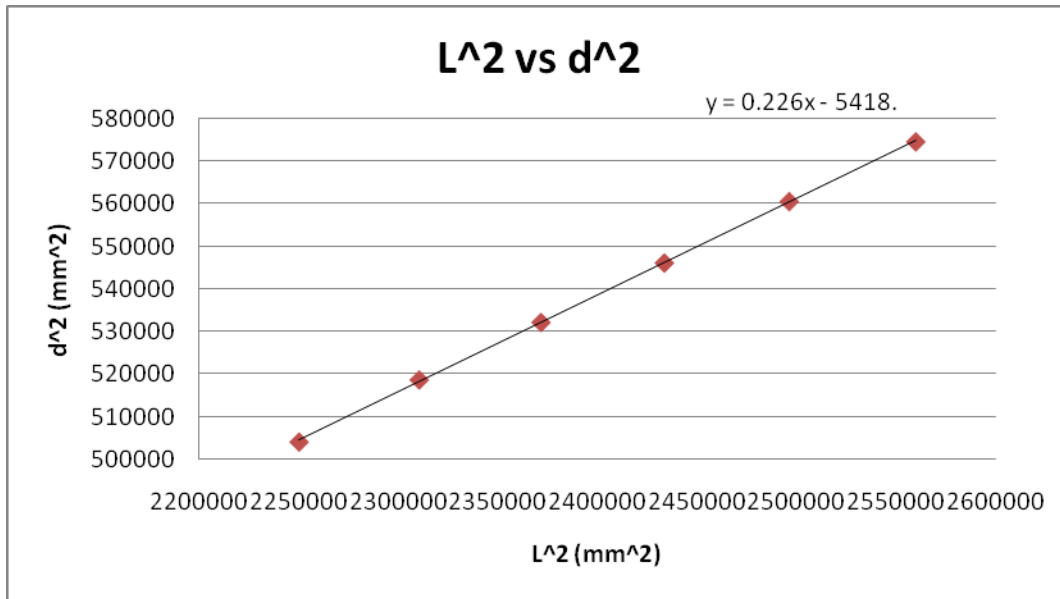
Donde b es la distancia entre surcos en el CD y L la distancia entre el CD y la pantalla, se obtuvieron los siguientes datos

Tabla 7. Valores obtenidos de la distancia entre máximos principales conforme se variaba la longitud de la rejilla de difracción (CD) a la pantalla de observación.

numero de medida	L (mm)	d (mm)
1	1500	710
2	1520	720
3	1540	729
4	1560	739
5	1580	748
6	1600	758

De la ecuación anterior, se tiene que $d^2 = \frac{L^2 b^2}{\lambda^2 - b^2}$ donde la pendiente es $\frac{L^2 b^2}{\lambda^2 - b^2}$. Para

obtener el valor experimental de esta pendiente se graficaron los valores de L^2 y d^2 llegando a la siguiente gráfica.



Gráfica 7. Distancia al cuadrado entre el CD y la pantalla de observación contra longitud al cuadrado entre el máximo de orden cero y el de primer orden observados en la pantalla.

Con lo que se obtiene $\frac{d^2}{L^2} = 0.226 \pm 0.0080$, entonces, $b = 0.001473 \pm 0.000052\text{mm}$, que

equivale a 678.518 ± 25 surcos por mm en el CD utilizado.

8.1 APÉNDICE C

Potencia óptica expresada en decibeles

$$\text{Nivel de potencia en decibeles} = 10 \log \left(\frac{\text{nivel de potencia}}{1 \text{ mW}} \right) \text{ dBm}$$

Ganancia óptica expresada en decibeles

$$\text{Ganancia en decibeles} = 10 \log \left(\frac{\text{Potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} \right) \text{ dB}$$

Atenuación de la señal al transitar por la fibra óptica

$$\text{Atenuación} = 20 \log \frac{V_1}{V_2}$$

8.4 APÉNDICE D

Cladding mode stripper

Es un método en el que la fibra óptica sin revestimiento, se introduce en un medio con índice de refracción igual o ligeramente mayor que su revestimiento original. De esta manera, los modos de revestimiento irradian fuera de la fibra óptica, sobreviviendo únicamente los modos de propagación del núcleo de la fibra.

Se quitó cuidadosamente el revestimiento de cada una de las fibras ópticas utilizadas con ayuda de una navaja y posteriormente se colocaron en glicerina, realizándose las pruebas pertinentes, después de esto, se colocaron las mismas fibras en aire. Para ambos casos se midió la eficiencia de acoplamiento entre la fuente láser y las fibras.

Los valores del índice de refracción del revestimiento de cada fibra son 1.419 y 1.409 respectivamente, mientras que los valores del índice de refracción de la glicerina y el aire son 1.47 y 1 respectivamente.

9. BIBLIOGRAFIA

- E. Hecht, A. Zajac. Óptica, cap. 10. Addison Wesley, 1986.
- J.D. Kraus, Electromagnetismo, cap. 12. McGraw-Hill, 1986.
- Charles M. Davis. Fiber optics sensors. Optic engineering, 347-351, 1990.
- Michael K. Barnoski. Introduction to integrated optics, cap. 12. Hughes research laboratories, 1973.
- Allan W. Snyder and John D. Love. Optical waveguide theory, 208-220. Chapman and Hall, 1983.
- Bass Michael, Van Stryland. Fiber, devices and systems for optical communications, 58-62. McGraw-Hill, 2002
- Henry Zanger, Cynthia Zanger. Fiber optics, communication and other applications, cap. 11. Macmillan Publishing Company, 1991
- Robert J. Hoss. Fiber Optics, cap. 2. Prentice Hall.
- Harold Kolimbris. Fiber optics communications, p. 54-60. Prentice Hall