



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Estudio de la repetibilidad de la respuesta de
un sensor refractométrico
en fibras ópticas

Tesis que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Luis Eduardo Yam Ontiveros

Director de Tesis

Dr. Serguei Khotiaintsev



Ciudad Universitaria, México, D.F. 2006



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.

A Rosa e Hilario, mis padres.

A Carlos, mi hermano.

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mis abuelos, gracias por su gran apoyo que me han brindado en todo momento y en cada proyecto que he emprendido, y que sin ellos hubiera sido muy difícil llegar hasta este punto.

A mis amigos, gracias por su ayuda, convivencia, y su amistad en sí que hizo el paso por la universidad una de las mejores etapas de mi vida.

A mis amigos con los que trabajé en este proyecto, Jordi y Kike; gracias por su ayuda y empeño dedicado.

A Dr. Serguei, gracias por su ayuda y consejos para la realización de este trabajo de tesis.

Índice de contenido

Introducción	1
Objetivos	2
Metas	2
Estructura de trabajo	2
1. Marco teórico de sistemas ópticos	4
1.1. Introducción	4
1.2. Leyes de Refracción	5
1.3. Principio de transmisión en fibras ópticas	6
1.4. Fuentes luminosas: LED y laser	9
1.5. Fotodiodo: principio de funcionamiento	13
1.6. Conclusiones	15
2. Sensores en fibras ópticas	16
2.1. Introducción	16
2.2. Nociones sobre sensores en fibra óptica	17
2.2.1. Sensores basados en modulación de la intensidad de la luz	17
2.2.2. Sensores basados en el espectro y fase de la señal.....	18
2.3. Refractometría	19
2.3.1. Técnicas básicas de refractometría	19
2.3.2. Ejemplos de refractómetros.....	23
2.4. Sensor refractométrico con elemento óptico semiesférico	26
2.4.1. Funcionamiento	26
2.4.2. Características de transmisión	29
2.5. Conclusiones	31
3. Instalación Experimental.....	33
3.1. Introducción	33
3.2. Subsistema mecánico.....	34
3.3. Subsistema óptico.....	35
3.3.1. Fotodiodo	35
3.3.2. Fuente de luz	36
3.3.3. Fibras ópticas	38
3.3.4. Elemento semiesférico de detección	41
3.4. Subsistema eléctrico	42
3.4.1. Circuito fotoreceptor	42
3.5. Adquisición de Datos	45

3.6. Calibración y caracterización en el aire	47
3.7. Conclusiones	49
4. Repetibilidad del sensor refractométrico	50
4.1. Introducción	50
4.1.1. Tipo de errores	51
4.1.2. Relación señal a ruido.	54
4.2. Pruebas de repetibilidad del sensor refractométrico	54
4.2.1. Consideraciones previas sobre el elemento óptico	54
4.2.1. Mediciones experimentales	56
4.2.2. Discusión de resultados	62
4.2.3. Conclusiones	63
5. Conclusiones Generales	64
Apendices	67
A. Código fuente de programas (Matlab)	68
B. Artículo publicado relacionado con el sensor refractométrico	74
Referencias	78

Introducción

Desarrollos en los campos de la optoelectrónica y fibras ópticas han trascendido a otras aplicaciones diferentes a las telecomunicaciones desde hace ya varios años, algunas de éstas se han enfocando a fines industriales para la creación de sensores aprovechando las ventajas inherentes que pueden ofrecer como tamaño muy pequeño, de baja potencia, inmunes a la interferencia electromagnética y su alta sensibilidad.

En particular, los sensores refractométricos en fibras ópticas ofrecen amplias perspectivas en la implementación de una nueva generación de sensores ópticos en aplicaciones relacionadas a procesos industriales, control de calidad en líquidos, discriminación entre fluidos, determinación de concentración de un soluto en una solución acuosa, procesos biomédicos, entre otros. Además, resulta sobresaliente la posibilidad de su uso *in-situ* y, por su base en fibras ópticas, realizar el procesamiento de la señal óptica a larga distancia si fuera necesario.

Una variante de interés particular es un sensor refractométrico con elemento óptico semiesférico [1]; es un sensor constituido por dos fibras ópticas acopladas mediante una estructura sólida (transparente y dieléctrica) de forma semiesférica. Este sensor permite detectar el índice de refracción de un medio y para ello se basa en la reflexión parcial y total interna de la luz sobre la superficie semiesférica. La característica que lo difiere a otros sensores de su clase es su geometría semiesférica que brinda mejores propiedades de enfoque al usarse en reflexión total interna propiciando un mejor acoplamiento entre los haces de luz de entrada y salida, y con ello una mejor sensibilidad.

Sin embargo, los conocimientos existentes sobre este tipo de sensor están limitados a simulaciones teóricas, principalmente; ya que la parte experimental realizada fue enfocada a corroborar algunos de los resultados teóricos más sobresalientes [1], pero por el momento no se cuenta con una instalación experimental con la precisión suficiente para poder continuar con la realización de pruebas experimentales.

Por ello, en el presente trabajo se pretende estudiar e investigar la repetibilidad que puede alcanzarse en las mediciones del sensor de elemento semiesférico con un

modelo a gran escala de éste en una instalación experimental que sea implementada con dispositivos de laboratorio. La finalidad es obtener nuevos conocimientos de carácter práctico sobre el funcionamiento del sensor de forma experimental respecto a su repetibilidad y de las problemáticas que pueden presentarse en torno a ésta, que deben ser tomadas en cuenta al utilizar este sensor para una determinada aplicación. Este trabajo pretende también servir como una base para siguientes etapas de investigación experimental sobre el sensor refractométrico, pero enfocadas propiamente a las diferentes aplicaciones que puede tener dicho sensor.

Objetivos

1. Desarrollar e implementar una instalación experimental que permita investigar las características de un modelo físico del sensor refractométrico.
2. Investigar experimentalmente la repetibilidad de la respuesta del sensor refractométrico empleado en medios líquidos.

Metas

- Conocer el equipo de laboratorio disponible, y con ello realizar la instalación experimental para el modelo a gran escala del sensor refractométrico mencionado.
- Verificar que la respuesta del modelo experimental del sensor corresponda a las predicciones teóricas de las simulaciones realizadas [1].
- Desarrollar experimentos cuyos resultados reflejen la repetibilidad del modelo del sensor con la instalación experimental usada y problemáticas que pueden afectar su funcionamiento en dicho aspecto.

Estructura de trabajo

El trabajo consta de cinco secciones. En la primera sección se realiza una revisión breve sobre los conceptos teóricos involucrados en la refractometría y, desde luego,

en el funcionamiento del refractómetro. En la segunda sección se da un panorama general sobre los distintos tipos de sensores basados en fibras ópticas, sobre la refractometría y la descripción del sensor refractométrico al que se enfoca este trabajo. En la tercera sección se describe la instalación experimental implementada, y se finaliza con una prueba de calibración. La cuarta sección se enfoca al aspecto de la repetibilidad que puede ser obtenida con la instalación experimental, describiendo los experimentos realizados y sus resultados. Finalmente, la quinta sección pertenece a las conclusiones generales de éste trabajo.

Este trabajo forma parte de un proyecto conjunto con dos compañeros que también realizan su trabajo de tesis. Así, los tres trabajos están relacionados entre sí, y cabe aclarar que el proceso de implementación de la instalación experimental fue realizado en colaboración conjunta.

1. Marco teórico de sistemas ópticos

1.1. Introducción

Es conocido que la luz se propaga siguiendo una trayectoria rectilínea. No resulta extraño considerar que la primera aproximación sobre el comportamiento de la luz se basa en el uso de rayos, lo denominado óptica geométrica. El rayo de luz es una entidad que sirve solamente como modelo para estudiar y comprender fenómenos básicos de la óptica como lo es la reflexión y la refracción que, en una primera aproximación, conciernen a la trayectoria que la luz a gran escala sin considerar aspectos como efectos en la intensidad, difracción, interferencia o interacciones con la materia.

Otras aproximaciones del comportamiento de la luz se han hecho para explicar otros fenómenos; una aproximación ondulatoria, óptica de ondas, asume que la luz se desplaza como una onda, explicando fenómenos como la difracción. Tras el trabajo de Maxwell, surge la teoría electromagnética de la luz, donde la luz se propone de naturaleza electromagnética. Esta teoría describe adecuadamente los fenómenos descritos por la óptica geométrica y la óptica de ondas; teniéndose un tratamiento más completo de la luz dentro de los límites de la óptica clásica. Sin embargo, para los fenómenos cuya naturaleza se describe por la mecánica cuántica, se usa un tratamiento mecánico-cuántico, lo que se denomina óptica cuántica. Con base en el tratamiento electromagnético, se construye la teoría mecano-cuántica de fotones (partícula de energía con masa cero) y su interacción con las cargas. La doble naturaleza de la luz se manifiesta por el hecho de que se propaga en el espacio como

una onda, presentando un comportamiento de partícula durante los procesos de emisión y absorción. La energía radiante electromagnética es creada y destruida en fotones y no continuamente como una onda clásica, pero su movimiento a través de una lente o un conjunto de rejillas, está sujeto a sus características ondulatorias. Así, dependiendo del fenómeno a estudiar, se utiliza la aproximación más adecuada.

1.2. Leyes de Refracción

Bajo los términos de la óptica geométrica, las leyes de refracción resultan más sencillas de tratar. La luz puede transmitirse, reflejarse o refractarse en la superficie de separación que existe entre dos medios diferentes, esto es, su trayectoria inicial sufre una desviación.

La *ley de reflexión* indica que al incidir un rayo de luz sobre un espejo, el ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_i (Figura 1.1a), estando el rayo incidente y reflejado en el mismo plano denominado plano de incidencia.

En un medio dieléctrico transparente, la luz se propaga a una velocidad menor en comparación con su velocidad en el vacío, siendo el índice de refracción asignado al medio dieléctrico indicador de la relación entre ambas velocidades. La *ley de refracción* indica que un haz de luz se desvía (Figura 1.1a) cuando atraviesa la interfaz de dos diferentes medios dieléctricos (con índices de refracción n_1 y n_2) siguiendo la ley de Snell

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_t \quad (1.1)$$

tanto el rayo incidente como el rayo transmitido se encuentran en el mismo plano.

De la ley de Snell, existe una condición para la cual no existe transmisión: un determinado ángulo de incidencia, conocido como *ángulo crítico*, para el que el rayo refractado forma un ángulo de 90° con la normal a la interfaz, por lo que se propaga a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Para ángulos mayores a dicho ángulo, se presenta el fenómeno de *reflexión total interna* (Figura 1.1b) donde la interfaz entre los medios se comporta como un espejo perfecto, reflejando sin pérdidas toda la intensidad óptica. El ángulo crítico está determinado de la ley de Snell por:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (1.2)$$

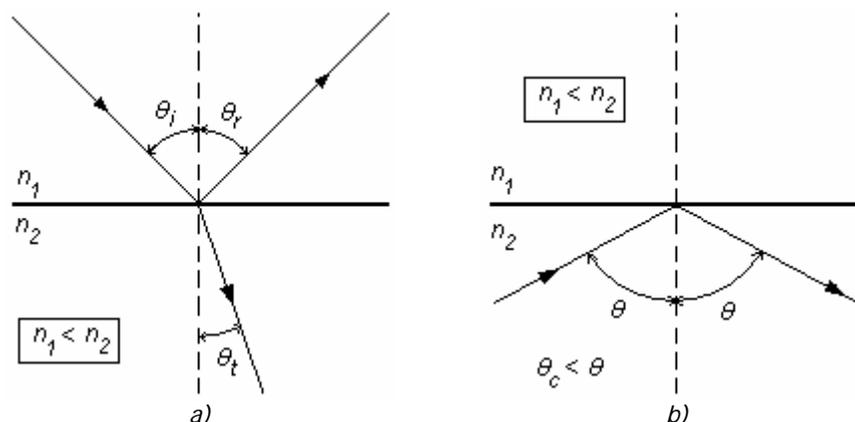


Figura 1.1. (a) Esquema de reflexión y refracción de la luz en la frontera de dos medios con índice de refracción n_1 e índice n_2 ; (b) reflexión total interna.

1.3. Principio de transmisión en fibras ópticas

Una fibra óptica básicamente es un cilindro constituido de material dieléctrico transparente (generalmente sílice, SiO_2) con un índice de refracción mayor al medio circundante. La propagación de la luz a través de la fibra se realiza aprovechando el fenómeno de reflexión total interna en la interfaz con el medio externo, lo que permite la transmisión de la luz con bajas pérdidas en su intensidad y, por tanto, transmisiones a gran distancia. Sin embargo, si existe algún defecto en la interfaz (imperfecciones físicas, humedad, polvo, aceites, etc.) la condición prevista de ángulo crítico puede no cumplirse, con lo que la luz se refractaría y saldría de la fibra (lo que se traduce como pérdidas en la intensidad óptica). Por ello se suele revestir el cilindro de material dieléctrico con otra capa de un material dieléctrico transparente con índice de refracción más bajo al del núcleo. Esta capa sólo necesita ser lo suficientemente gruesa para proporcionar el aislamiento deseado. Así, se tiene una estructura de dos cilindros concéntricos: núcleo (n_1), el cilindro interno, y revestimiento (n_2), la capa externa (Figura 1.2).

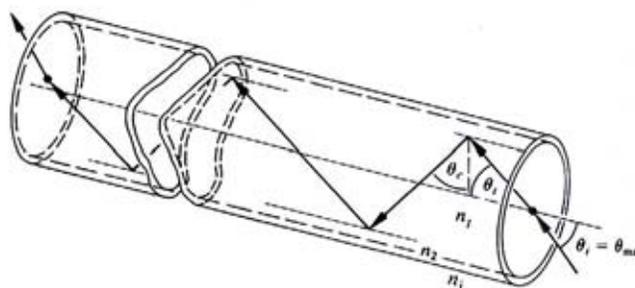


Figura 1.2. Estructura básica de una fibra óptica. [8]

Tomando como referencia la Figura 1.2, existe un valor máximo (θ_{max}) de θ_i para el cual el rayo interno incidirá con el ángulo crítico θ_c ; los rayos que incidan en la cara de la fibra con ángulos mayores a θ_{max} , no cumplirán con la condición de reflexión interna, en la interfaz núcleo-revestimiento, reflejándose solo parcialmente y abandonando rápidamente la fibra. Así, el ángulo θ_{max} , llamado *ángulo de aceptación*, define el semiángulo del cono de aceptación de la fibra, y puede demostrar que

$$\text{sen}\theta_{max} = \frac{1}{n_i} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$

siendo n_i , n_1 y n_2 los índices de refracción del medio externo, del núcleo de la fibra, y del revestimiento, respectivamente. La cantidad $n_i \text{sen}\theta_{max}$ se define como la *apertura numérica* (o NA, de sus siglas en inglés de *numerical aperture*). La apertura numérica esta asociada a la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla, y no depende de sus dimensiones físicas, sino de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento.

Por reflexiones internas, la luz se propaga a través la fibra. Sin embargo, por la naturaleza ondulatoria de la luz existen interferencias entre las múltiples ondas dentro de la fibra, por lo que la propagación efectiva de energía existe cuando la interferencia es constructiva, esto es, que no se provoque la anulación del campo eléctrico (o magnético). El análisis completo se realiza mediante las ecuaciones de Maxwell, pero para efectos de esta sección introductoria, se comentan los resultados en forma cualitativa. Así, la condición de la interferencia constructiva hace que determinadas direcciones de propagación que bajo la óptica geométrica son permitidas, no puedan ocurrir. Las direcciones permitidas constituyen los llamados *modos de propagación*. Una característica es que mientras más grande sea el diámetro de la fibra respecto a la longitud de onda (λ) de la luz que viaja dentro, mayor número de modos de propagación son permitidos; al contrario, al disminuir el espesor de la fibra, disminuye el número de modos de propagación, inclusive se puede llegar a condicionar que solo sea permitido un modo. Los modos de orden más bajo, sufren pocas reflexiones totales, mientras que los de orden elevado llevan a cabo más de estas, lo que se traduce en que recorren una trayectoria óptica mayor; por lo que al tener varios modos dentro de la fibra aquellos rayos que correspondan a modos de orden superior, tardarán más en llegar al otro extremo de la fibra que aquellos que corresponden a modos de orden inferior, con lo que se tiene dispersión modal.

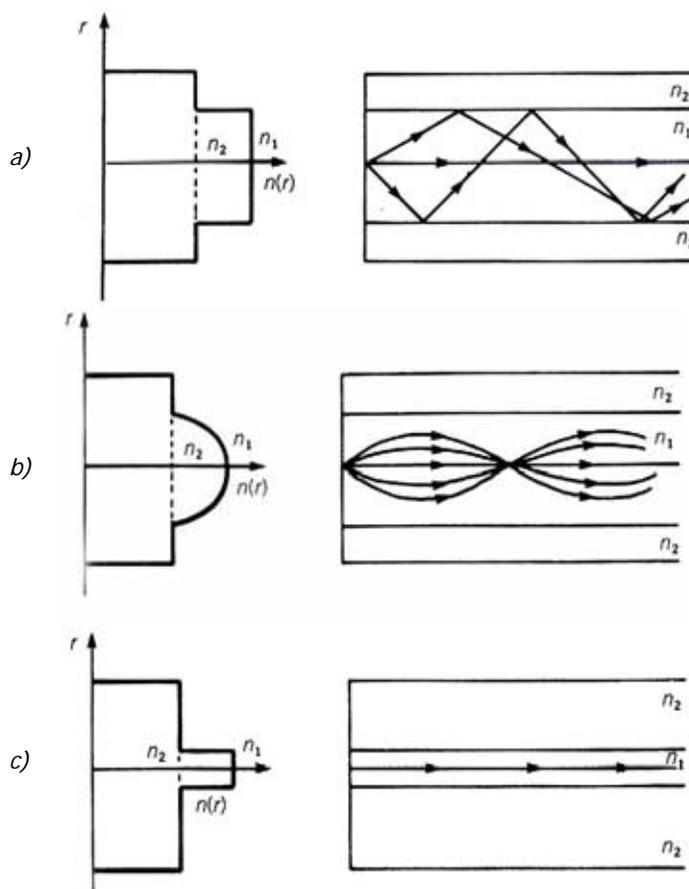


Figura 1.3. Principales configuraciones de fibras ópticas junto con sus correspondientes perfiles de índice: a) fibra de índice escalonado, b) fibra de índice gradual, y c) fibra monomodo. [9]

Existen tres tipos principales de fibras:

Fibra de índice escalonado. Puede o no tener revestimiento. El núcleo es relativamente ancho, y los índices de refracción de éste y del revestimiento son constantes. Los diámetros del núcleo varían de 10 a 200 μm y los del revestimiento de 150 a 250 μm , con aperturas numéricas alrededor de 0.3. Este tipo de fibras son generalmente multimodo y usadas para uniones a corta distancia. La Figura 1.3a muestra el esquema de la fibra de índice escalonado.

Fibra de índice gradual. En esta fibra el índice del revestimiento se mantiene constante, mientras que el índice del núcleo disminuye gradualmente hacia el revestimiento (Figura 1.3b), esto con el fin de igualar los tiempos de recorrido de los diferentes modos, y con ello reducir la dispersión modal. El diámetro del núcleo es generalmente de 50 μm y el del revestimiento de 125 μm , con apertura numérica alrededor de 0.2; generalmente son usadas para enlaces de alta capacidad de información.

Fibra monomodo. Puede ser de índice escalonado o gradual, pero la particularidad de esta fibra es que permite solo la propagación de un modo, con lo que se elimina la dispersión modal. Generalmente, el diámetro del núcleo es alrededor de 6 a 8 μm (unas 10 longitudes de onda), y el del revestimiento alrededor de 125 μm . Otra particularidad es que la diferencia relativa entre los índices de refracción es del orden de 0.005. Son usadas generalmente para enlaces a grandes distancias. La Figura 1.3c muestra el esquema de la fibra monomodo (de índice escalonado).

1.4. Fuentes luminosas: LED y laser

Existen dos grandes categorías de fuentes luminosas: las incandescentes y las luminiscentes.

Todo cuerpo que se calienta emite energía en forma de radiación. Es a lo que se le llama emisión del cuerpo negro o incandescencia. Las fuentes incandescentes, como lámparas con filamento calentado, emiten un espectro continuo de longitudes de onda. Estas fuentes térmicas por su naturaleza son muy lentas por lo que no son fáciles de modular, de un tamaño relativamente grande, y consumen mucha potencia para su funcionamiento.

Las fuentes luminiscentes se basan en procesos de luminiscencia donde la energía es absorbida por la materia y luego reemitida en forma de fotones. Dentro de éste proceso puede ocurrir que la emisión ocurra casi inmediatamente a la excitación, lo que se denomina fluorescencia, mientras que cuando existe un retardo entre los dos procesos se denomina fosforescencia. Una de las características de la luminiscencia, a diferencia de la incandescencia, es que la fuente excitante no es térmica, y que las fuentes que trabajan bajo este proceso no emiten en un espectro continuo sino en bandas de longitudes de onda.

Emisión espontánea y emisión estimulada

La emisión espontánea y la emisión estimulada son procesos que están involucrados en el funcionamiento de algunas fuentes luminiscentes. Para explicarlos brevemente, se consideran dos niveles de energía E_1 , nivel fundamental, y E_2 . Un electrón situado en E_1 está en su estado fundamental o normal. El nivel E_2 , con energía superior a E_1 , no está ocupado por un electrón. Si un fotón, u otra partícula energética, tiene una energía superior o igual a $E_2 - E_1$, cede esta energía al electrón que pasa al nivel E_2 , y el primero desaparece (Figura 1.4a). Fue absorbido. El átomo se encuentra entonces en un estado excitado.

Un átomo excitado está en un estado anormal o inestable. Este átomo tenderá a volver a su estado fundamental, regresando al nivel E_1 que libera, en forma de luz, la energía E_2-E_1 . Éste es el fenómeno de emisión espontánea (Figura 1.4b).

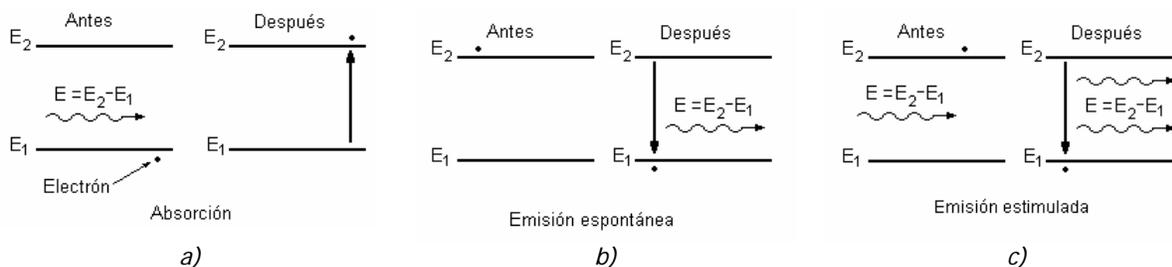


Figura 1.4. a) Excitación de un átomo por absorción de un fotón de energía E_2-E_1 . b) Emisión espontánea de un fotón de energía E_2-E_1 por un átomo excitado. c) Emisión estimulada de un fotón de energía E_2-E_1 provocada por un fotón de energía E_2-E_1 . El átomo se encuentra excitado inicialmente.

Ahora, si un fotón de energía E_2-E_1 llega mientras el átomo está excitado, provoca instantáneamente el regreso del electrón hacia el nivel E_1 y la emisión de un nuevo fotón. El fotón emitido se encuentra en fase con el fotón que provocó la transición. Este es el fenómeno de emisión estimulada, y el esquema de éste se muestra en la Figura 1.4c.

LED y laser

Para muchos sensores en fibra óptica, las fuentes de luz son basadas en semiconductores debido a que ofrecen ventajas en el consumo de potencia, confiabilidad, tamaño, y costo que frecuentemente excluyen la selección de fuentes de luz alternativas.

Como se mencionó, existen dos mecanismos de emisión de fotones y que son aplicables a la juntura p-n debido a la recombinación de electrones con los huecos. Una es la emisión estimulada, que es mecanismo básico del funcionamiento del laser. La otra es la emisión espontánea, que es el mecanismo básico del diodo emisor de luz (*Light-emitting diode, LED*).

En un semiconductor, los distintos estados energéticos posibles de los electrones están cuantificados en niveles, creándose bandas energéticas permitidas separadas por saltos o bandas prohibidas (Figura 1.5). El salto energético fundamental, de valor E_g , separa la banda de valencia ocupada más alta de la banda de conducción más bajas sin ocupar. La ocupación inicial de las bandas se altera mediante la polarización externa del semiconductor, inyectando electrones en la parte inferior de la banda de conducción a través de un contacto resistivo o extrayéndolos de la parte superior de la banda de valencia.

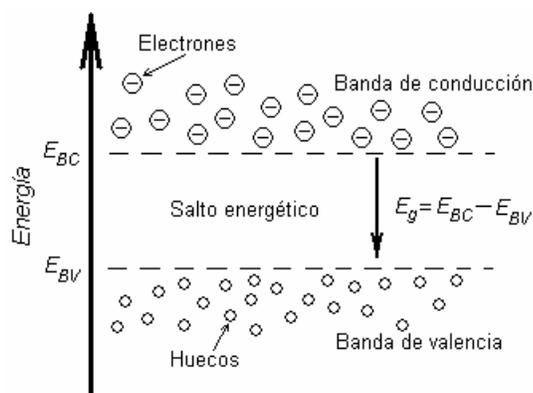


Figura 1.5. Esquema de bandas de energía en una unión p-n

La corriente inyectada provocará la recombinación de huecos de la banda de valencia con electrones de la banda de conducción, lo que, a su vez, es causa de la emisión de fotones cuya energía equivale al salto energético del electrón que pasa de la banda de conducción a la de valencia para recombinarse.

Al existir emisión espontánea en la unión $p-n$, y dado que es un proceso aleatorio similar al que ocurre en una emisión por incandescencia, las ondas emitidas no se encuentran en fase entre sí, ya que cada emisión es independiente a cualquier otra en su generación; esto lleva consigo que unas a otras se anulen total o parcialmente, y que la potencia neta de salida se vea reducida con respecto a la que se tendría si los efectos de interferencia no ocurrieran. La Tabla 1.1 muestra algunos materiales semiconductores usados en la fabricación de LEDs y la longitud de onda a la cual radian.

Semiconductor	λ (nm)
GaAs	870 - 900
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$)	640 - 870
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($y \approx 202x$, $0 < x < 0.47$)	1000 - 1600
InGaN	430 - 460
SiC	460 - 470
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y < 0.45$)	630 - 870
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($y > 0.45$)	560 - 700

Tabla 1.1. Algunos materiales semiconductores usados para la fabricación de LEDs.

Por otra parte, la emisión que presenta un diodo laser es siempre coherente, esto es, las ondas que emergen de él están siempre en fase, independientemente de cual sea su ancho espectral de emisión, siendo éste último más reducido que el de los LEDs.

Se llevan a cabo tres distintos procesos en la absorción y emisión de luz que son relevantes para un laser: absorción de un fotón, emisión de un fotón, y emisión estimulada. Estos tres procesos están implicados en el modelo laser básico de tres

niveles mostrando en la Figura 1.6. En éste, los electrones en el medio activo (semiconductor) se consideran que tienen solamente tres niveles de energía (aunque en realidad existen un gran número de éstos niveles). Con la absorción se incrementa la energía del nivel 1 al nivel 3 (proceso llamado *bombeo*), la emisión espontánea reduce la energía al nivel 2, donde los electrones tienen un tiempo de vida más largo o estado metaestable, y la emisión estimulada ocurre entre los niveles 2 y 1. La acumulación de electrones excitados en el estado metaestable resulta en una sobrepoblación (incremento del número de electrones), o inversión de población en relación con el estado base de energía. La emisión estimulada es la liberación en forma de luz de esa energía acumulada; un fotón llega al electrón excitado, y dos fotones salen, con la misma energía, viajando juntos y en fase, teniéndose una amplificación de la luz, de ahí el acrónimo *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*).

En los diodos de unión p-n, el proceso de inversión de población se produce en la capa activa al inyectar en ella los electrones procedentes de la fuente externa; las uniones de mayor salto energético que la circundan impiden que las recombinaciones se produzcan fuera de aquí.

En un *laser*, se debe de conseguir que los fotones producidos aparezcan para su uso como fuente de luz, pero al mismo tiempo debe de reservarse una parte de ellos para realimentar el proceso e intentar automantener la emisión estimulada; así, es necesario contar con una cavidad resonante que mantenga una porción de la luz en el medio activo mediante reflexiones, y dejar salir la otra porción. Los fotones que permanecen en el resonador crean una reacción en cadena y amplificando la luz mediante la emisión estimulada. La corriente necesaria para que el proceso se autosostenga se denomina *corriente de umbral*, por debajo de la cual el diodo *laser* se comporta como un LED. El modelo básico de la Figura 1.6 considera el proceso teniendo la cavidad resonante y una corriente de alimentación mayor a la corriente de umbral.

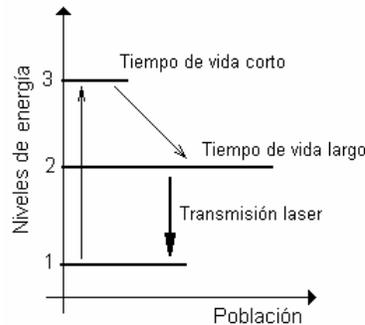


Figura 1.6. Niveles de energía y niveles de población del modelo láser de tres niveles.

El LED y el diodo láser parten de la emisión espontánea como funcionamiento básico, sin embargo, estructuralmente, el LED es más simple que los diodos láser, y comparándolo con éste, el LED presenta las siguientes ventajas:

- El costo de fabricación es menor.
- El LED puede operar a mayores temperaturas, mientras su operación es menos influenciada por variaciones en la temperatura.
- La corriente de alimentación es moderadamente baja, y el circuito de alimentación es simple.
- La potencia óptica de salida prácticamente es lineal con respecto a la corriente de alimentación.
- El tiempo de vida es muy largo, del orden de 10^8 horas. [6]

Las desventajas del LED son:

- El LED tiene un espectro amplio de longitudes de onda (10 - 50 nm)
- El ancho del haz de radiación es mucho más amplio que el del láser.

El LED, entonces, puede ser utilizado como fuente de luz en aplicaciones donde no sea crítica la atenuación y el ancho espectral de la fuente, proveyendo una solución de menor costo.

1.5. Fotodiodo: principio de funcionamiento

El fotodiodo forma parte de la familia de los fotodetectores que, básicamente, transforman la luz en una señal eléctrica. Existen dos categorías generales en que se puede clasificar los fotodetectores: los detectores térmicos y los detectores cuánticos. En los detectores de la primera categoría, la radiación es absorbida y se genera un incremento en la temperatura del dispositivo, lo que a su vez provoca una variación sensible de un parámetro físico como la resistencia eléctrica o la constante

dieléctrica. En los sensores de la segunda categoría, la conversión de la radiación se lleva a cabo por la transferencia de la energía de fotones a electrones en un sólido, por ejemplo, al hacer que el electrón salga del sólido por la absorción de dicha energía (efecto fotoeléctrico) o, en el caso de semiconductores, que con ayuda de la energía del fotón se propicie la creación de pares electrón-hueco libres (fenómeno de fotoconducción), esto es, que electrones pasen a la banda de conducción por la absorción de la energía de los fotones. Dentro de los fotodetectores basados en el fenómeno de fotoconducción, los fotodiodos de estructura $p-n$ y $p-i-n$ son algunos de los utilizados en aplicaciones de óptoelectrónica debido a su tamaño pequeño, su rapidez en respuesta, y su sensibilidad.

Generalmente, el fotodiodo de unión $p-n$ es polarizado de forma inversa, usando su característica fotoconductiva. Alrededor de la unión $p-n$ se forma la región de depleción donde no existen portadores de carga libres, pero sí un campo eléctrico (Figura 1.7a). Al incidir fotones con determinada energía (mayor a la de la banda prohibida) en la unión $p-n$, son absorbidos y se crean pares electrón-hueco. Por el campo eléctrico existente, los electrones y los huecos son separados y conducidos a direcciones opuestas a las zonas n y p , respectivamente. Conducir los portadores genera corriente (fotocorriente, I_{ph}) en el circuito externo la cual proporciona la señal eléctrica. La fotocorriente resulta proporcional a la potencia óptica incidente.

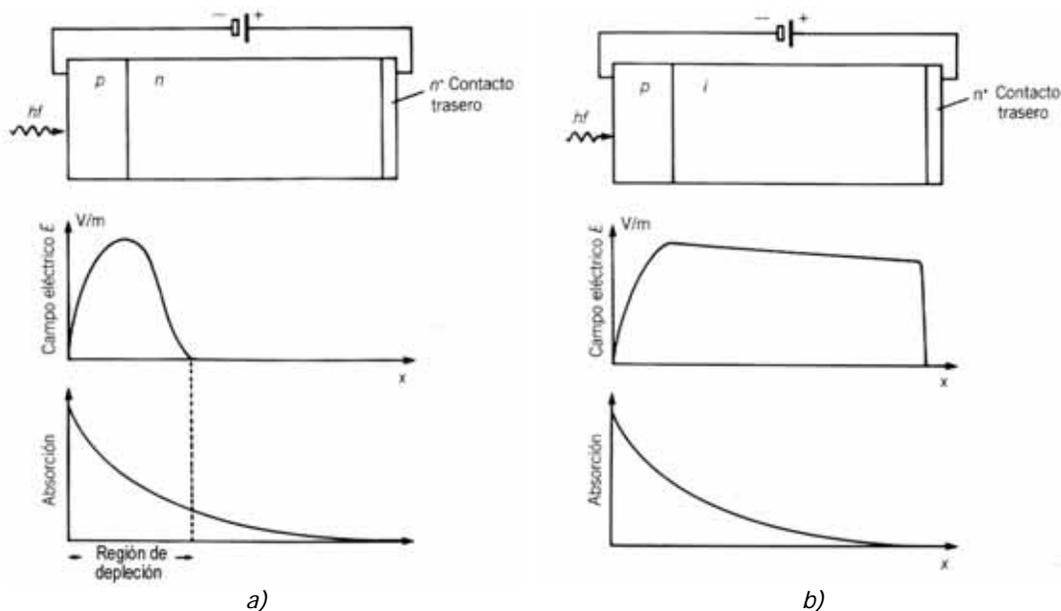


Figura 1.7. a) fotodiodo $p-n$ en polarización inversa, variación del campo eléctrico en la región de depleción y variación de la potencia óptica por la absorción dentro del fotodiodo. b) fotodiodo $p-i-n$ en polarización inversa, variación del campo eléctrico en la región de depleción y variación de la potencia óptica por la absorción dentro del fotodiodo. [9]

Con el fin de incrementar la región de depleción, se puede incrementar la polarización inversa, o insertar una capa de material semiconductor intrínseco (o bien, ligeramente dopado) entre las capas p y n ; con esto último se tiene el denominado fotodiodo $p-i-n$ (Figura 1.7b). Se busca que la región de depleción sea tan larga como sea la penetración de la potencia óptica en el material para que los pares electrón-hueco sean fotogenerados en la zona intrínseca donde predomina el campo eléctrico.

Para la generación de pares electrón-hueco por la absorción de fotones, la energía del fotón debe ser al menos igual a la energía de la banda prohibida ($h(c/\lambda_g) = E_g$) del material semiconductor para que el electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción, lo que implica la existencia de una longitud de onda de corte:

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \quad (1.4)$$

La elección del material para un fotodiodo debe ser tal que la energía de los fotones que incidan en él sea mayor a E_g , y además, considerar el coeficiente de absorción del material semiconductor, pues si dicho coeficiente es muy grande, muy poca radiación óptica podría llegar a la región de depleción para la fotogeneración de pares electrón-hueco, pero si el coeficiente de absorción es muy pequeño, solo una poca porción de fotones serán absorbidos en la región de depleción.

1.6. Conclusiones

Dependiendo del fenómeno a estudiar, la luz puede ser tratada como mejor convenga, por ejemplo, para casos a gran escala donde importa solo la trayectoria de la luz, la óptica geométrica resulta suficiente; en cambio, para tratar fenómenos donde interviene la luz pero cuya naturaleza es descrita por la cuántica, la teoría electrodinámica cuántica ayudaría en el estudio de dichos fenómenos.

Los elementos que constituyen un sistema óptico tales como la fuente de emisión, las fibras ópticas y el fotodetector, deben de ser elegidos de tal forma satisfagan las necesidades de funcionamiento del sistema. Se debe de tener en cuenta que en los sensores ópticos no siempre es necesario el uso de láseres. Dependiendo del tipo del sensor, pueden ser utilizadas fuentes de luz más sencillas (por ejemplo LEDs). De una manera similar, no siempre es necesario el uso de fibras monomodo.

2. Sensores en fibras ópticas

2.1. Introducción

En los años recientes se ha tenido una revolución en la industria en los campos de la optoelectrónica y fibras ópticas. Por parte de la optoelectrónica los desarrollos se encuentran en todos los dispositivos que se basan en la óptica como parte de algún proceso, mientras que el campo de las fibras ópticas ha tenido su mayor crecimiento en la industria enfocada a las telecomunicaciones. Sin embargo, existe también un gran desarrollo en tecnología asociada con la optoelectrónica y las fibras ópticas para fines industriales de sensores.

Los sensores basados en el uso de fibras ópticas han sido mejorados y en ocasiones han sustituido completamente a los sensores tradicionales de mediciones de rotación, aceleración, campo eléctrico y magnético, temperatura, presión, acústica, vibración, posición lineal o angular, tensión, humedad, viscosidad, propiedades químicas, entre otros; en varios casos, las ventajas inherentes de los sensores en fibra óptica como su ligereza, tamaño muy pequeño, pasivos, de baja potencia, inmunes a la interferencia electromagnética, alta sensibilidad y su ancho de banda, resultan de mayor consideración para usarlos en varias aplicaciones.

2.2. Nociones sobre sensores en fibra óptica

Los sensores en fibras ópticas usualmente son clasificados como sensores en fibra óptica extrínsecos, o también llamados híbridos, y los sensores en fibra óptica intrínsecos, o todo en fibra. En el caso de los sensores extrínsecos una fibra óptica se dirige a una “caja negra” que asienta información en el haz de luz en respuesta a un efecto del medio externo. Dicha información se asienta en términos de modificar algún parámetro del haz, tal como la intensidad, la fase, la frecuencia, la polarización, el contenido espectral u otro. Entonces, una fibra óptica recoge la luz con la información del medio externo a un procesador óptico y/o electrónico. En varias aplicaciones la fibra óptica de entrada también actúa como fibra de salida. Por otra parte, un sensor en fibra óptica intrínseco usa una fibra óptica para llevar el haz de luz, y los efectos del medio externo asienta la información en el haz de luz mientras se encuentra en la fibra. Cada clase de sensores en fibra contiene subclases de un gran número de sensores.

2.2.1. Sensores basados en modulación de la intensidad de la luz

Existen varios sensores extrínsecos e intrínsecos que se basan en la modulación de la intensidad de la luz. Muchos de estos sensores son enfocados a aplicaciones para medir vibraciones, desplazamiento (traslación) o posición. La Figura 2.1 muestra el esquema básico de un sensor de vibraciones. Variaciones de estos sensores pueden usar membranas o rejillas que modifiquen la intensidad de la luz.

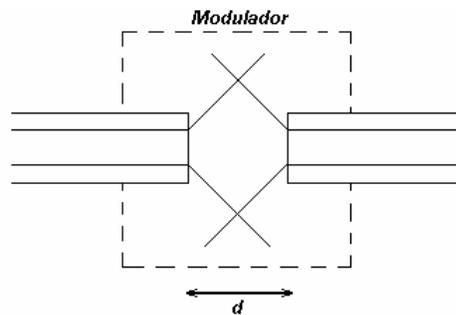


Figura 2.1. Sensor en fibras ópticas extrínseco basado en modulación de la intensidad de la luz; la distancia d entre las fibras determina la cantidad de luz que ingresa a la fibra de salida.

Otra clase de sensores basados en la intensidad de la luz consisten en usar el principio de reflexión total interna. En estos sensores se usa una superficie que es la frontera con el medio externo, y la luz sufre reflexión total interna en dicha superficie bajo ciertas condiciones del medio que lo rodea (como cambios en el índice de refracción) provocando modulación en la intensidad del haz de luz. Sensores bajo este principio son usados para mediciones de presión, índice de refracción, niveles de

líquido, entre otros. La Figura 2.2 muestra el esquema de dos sensores que trabajan con modulación de la luz mediante reflexión total interna.

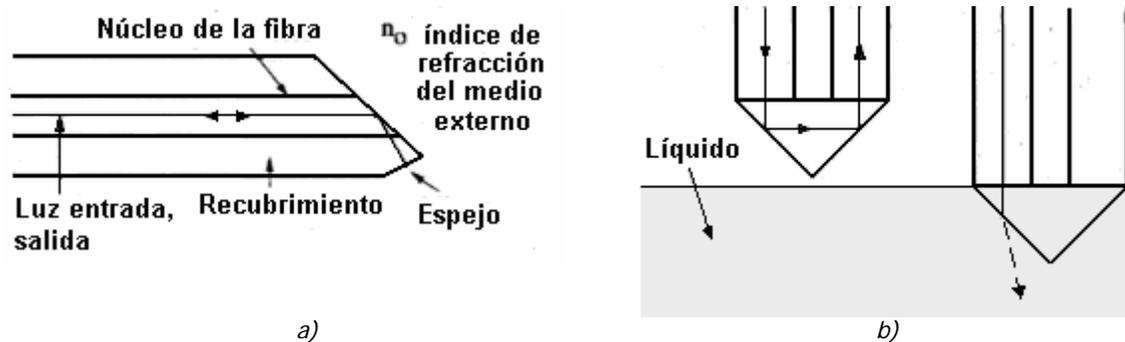


Figura 2.2. a) Sensor en una misma fibra que usa la reflexión total interna. b) sensor de líquido basado en reflexión total interna utilizando una fibra de entrada y una fibra de salida.

Otros métodos que se basan en la amplitud usan fenómenos propios referentes a la propagación de la luz en la fibra misma. Al colocar núcleos de la fibra cerca uno del otro, a lo largo de una distancia de interacción, parte de la luz que viaja en el revestimiento (onda evanescente) puede ingresar en el núcleo de la otra fibra, teniéndose al final de ésta una determinada intensidad de luz. El acoplamiento entre las fibras depende de la longitud de onda de la luz, del índice de refracción del medio que rodea los núcleos de las fibras, la distancia entre los núcleos y la longitud de interacción; por lo que el sensor puede ser aplicado a medir cualquiera esos parámetros. Otro sensor basado en la propagación de la luz en la fibra es mediante un transductor de microcurvaturas, donde los efectos del medio externo modifican el número de microcurvaturas y con ello las pérdidas que existen en la fibra.

2.2.2. Sensores basados en el espectro y fase de la señal

Otro tipo de sensores pueden utilizar como parámetro de medición el espectro del haz de luz. Los sensores en fibra óptica basados en el espectro dependen en un haz de luz modulado en longitud de onda por efectos del medio externo. Ejemplos de este tipo de sensores incluyen los basados en radiación de cuerpo negro, absorción, fluorescencia, y rejillas dispersivas.

Los sensores basados en radiación de cuerpo negro son usados para mediciones de temperatura. Un arreglo básico consiste en colocar una fibra óptica en una cavidad de cuerpo negro, el cual a determinadas temperaturas comienza a radiar y a comportarse como una fuente de luz, lo que puede ser detectado en el otro extremo de la fibra.

Los sensores basados en fluorescencia son usados para aplicaciones médicas y mediciones químicas, pero también pueden usarse para mediciones físicas como temperatura, viscosidad y humedad. Una configuración usada para estos sensores es el

caso de sensor de punta final (*end-tip sensor*) donde el material fluorescente de prueba se coloca al final de la fibra; la luz viaja a través de la fibra hasta llegar a dicho material. La señal fluorescente es capturada por la misma fibra y dirigida de regreso a un demodulador de salida.

También existen sensores cuyo funcionamiento esta basado en modificación de la fase del haz de luz. Estos sensores usan interferómetros (como de Mach-Zehnder y Michelson) para su funcionamiento. Su geometría flexible y su alta sensibilidad permiten la posibilidad de una gran variedad de arreglos. Sus aplicaciones están basadas generalmente en la modificación de la fase como parámetro del haz de luz a modificar por el medio externo, lo que implica directamente que la fuente de luz a usar debe de ser coherente. Aplicaciones de estos sensores son para mediciones acústicas, vibraciones, presión o incluso en ligeros cambios en el índice de refracción de un medio.

2.3. Refractometría

La refractometría se refiere a la medición de la capacidad de los cuerpos para refractar la luz, esto es, medir su índice de refracción. El índice de refracción nos indica el cambio de velocidad que experimenta la radiación óptica usando como referencia el vacío; es una cantidad adimensional y para los materiales transparentes se considera un número real, mientras que para materiales absorbentes se representa con un número complejo. Para materiales isotrópicos es suficiente asignarles un índice de refracción, mientras para los anisotrópicos pueden poseer más de un índice de refracción, por lo que en forma más general el índice de refracción se representa mediante un tensor.

2.3.1. Técnicas básicas de refractometría

Método por acoplamiento de índice de refracción

Es un método simple pero usado solamente para medición del índice de refracción de los sólidos. Si la luz viaja por un medio con un único índice de refracción, no sufrirá desviaciones en su trayectoria, reflexiones ni cambios de fase. Así, una muestra sólida de interés puede ser sumergida en un líquido que no lo disuelva, pernee o reaccione, y si los índices de refracción se acoplan, la luz que viaje por ese medio no se verá afectada en su trayectoria (ni en su fase). La muestra de sólido debe ser dividida finamente como polvo, el cual se sumergirá en el líquido, y se asume que las partículas son isotrópicas y homogéneas.

Este método proporciona una precisión aproximada de 0.005 en el índice de refracción por inspección visual [4].

Métodos de Desviación

Los métodos de desviación se usan para, mediante la ley de Snell, obtener el índice de refracción. El método más simple es la desviación lateral y ocurre cuando un haz de luz es transmitido a través de una muestra de la sustancia de caras paralelas de un ancho L_1 .

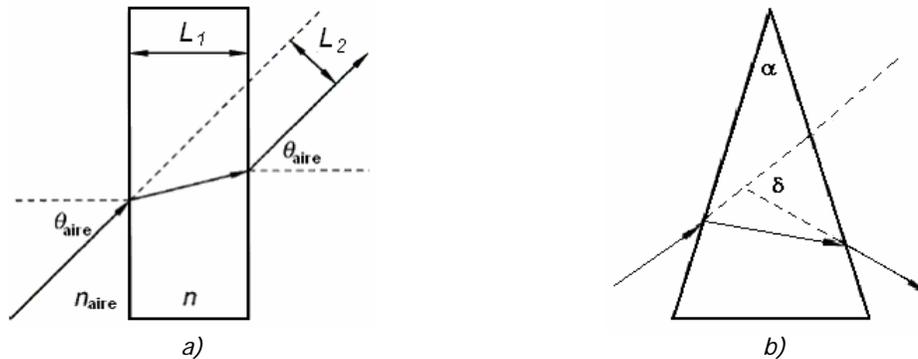


Figura 2.3. a) Desviación lateral de un haz de luz al atravesar un medio con índice de refracción n . b) Desviación angular de un haz en el material, donde α es el ángulo del prisma y δ es el ángulo de desviación.

La precisión del método radica en la medición de los parámetros L_1 , θ_{aire} y L_2 ; mediante óptica geométrica se puede demostrar que:

$$\frac{n}{n_{aire}} = \text{sen} \theta_{aire} \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \theta_{aire}}{\text{sen} \theta_{aire} - \frac{L_2}{L_1}} \right)^2} \quad (2.1)$$

Con éste método se pueden alcanzar precisiones alrededor de 0.001 en el índice de refracción.

Un segundo método de desviación consiste en el uso de una muestra en forma de prisma triangular; éste es el método de desviación angular mostrado en la Figura 2.3b. Se hace incidir la luz en una de las caras de la muestra y el haz de luz de salida se desvía en forma angular. En el ángulo de mínima desviación δ se puede demostrar que

$$\frac{n}{n_{aire}} = \frac{\text{sen} \left(\frac{\alpha + \delta}{2} \right)}{\text{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad (2.2)$$

La incertidumbre en el índice de refracción es de 0.0003 [4] considerando una incertidumbre de 1' en la medición del ángulo δ y un prisma cuya cara triangular corresponda a $\alpha=60^\circ$.

Ambos métodos mencionados anteriormente pueden ser empleado en el caso de muestras líquidas, empleando una celda contenedora con caras paralelas. Dicha celda proporciona una desviación lateral, pero no causarán desviación si se emplean para conformar un prisma hueco como contenedor de la muestra.

Método del ángulo crítico

Este método aprovecha el fenómeno del ángulo crítico para cuantificar el índice de refracción de un medio. Las muestras son colocadas en una de las caras de un prisma refractométrico. Para realizar la medición del ángulo crítico se puede utilizar el modo de transmisión o el modo de reflexión variándose el ángulo de incidencia del haz. En el modo de transmisión, la interfase muestra-prisma es iluminada a través de la muestra, midiendo el ángulo crítico cuando la transmisión es mayor. La transmisión de la muestra al prisma es cero para $\theta > \theta_{crítico}$. Por otra parte, en el modo de reflexión se ilumina la interfase prisma-muestra a través del prisma, teniéndose la máxima reflexión (100%) para $\theta > \theta_{crítico}$.

Método del ángulo de Brewster

El ángulo de Brewster es en el cual, al incidir un haz de luz en una interfaz entre dos medios con diferente índice de refracción, solo es reflejada la luz cuya polarización es paralela al plano de la interfaz. Así, si a una interfaz entre dos medios se hace incidir luz linealmente polarizada con su campo eléctrico en el plano de incidencia, en el ángulo de Brewster no habrá luz reflejada (Figura 2.4). De las ecuaciones de reflexión de Fresnel, considerando el caso anterior, el ángulo para el cual no hay luz reflejada esta determinada por

$$\theta_B = \text{ang} \tan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

El ángulo θ_B es medido para la condición de inexistencia de luz reflejada polarizada linealmente por la superficie de la muestra.

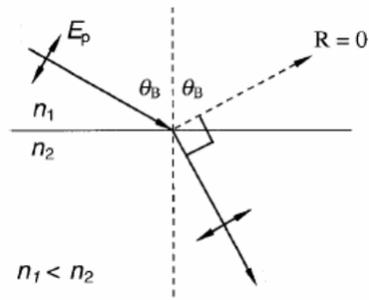


Figura 2.4. Esquema del método del ángulo de Brewster. La luz incidente tiene polarización lineal siendo el campo eléctrico paralelo al plano de incidencia.

Usando un láser y por inspección visual de la reflectancia mínima, se puede lograr una precisión del 0.1° , con lo que se tiene una precisión en el índice de refracción de la muestra en cuestión de 0.005, pero esta precisión puede incrementarse de 10 a 100 veces usando métodos fotométricos de precisión [4]. Este método tiene la ventaja de no requerir un material de referencia extra (como un prisma), sin embargo es un método usado principalmente en los laboratorios.

Método de interferometría

En este método se utiliza el fenómeno de la disminución de la velocidad de la luz cuando viaja en un medio para cuantificar el índice de refracción. Una muestra con una estructura geométrica tal que tenga cara de entrada y salida paralelas es colocada en el haz de un interferómetro de dos haces (como el Michelson o Rayleigh); si la muestra tiene una longitud z y un índice de refracción n , entonces causará un retraso en la fase de $2\pi n z / \lambda_0$ con respecto a la propagación del haz en el aire (con n_{aire}). Entonces, la diferencia de fase será:

$$\delta = \frac{2\pi(n - n_{aire})z}{\lambda_0} \quad (2.4)$$

La diferencia de fase está relacionada con el índice de refracción del material, pues se puede suponer el índice de refracción del aire como ya conocido. La diferencia de fase puede ser medida haciendo el ajuste con un compensador de fase hasta obtener un patrón de interferencia de orden cero; o bien, se pueden contar directamente las franjas en el patrón de interferencia, correspondiendo cada una de éstas a cambios de fase en π [rad]. Por métodos electro-ópticos se pueden medir hasta 10^{-6} de franja [4], potencialmente teniéndose una precisión alta. La problemática que presenta es que el interferómetro es caro y delicado. Principalmente se utiliza este método para medición de índices de refracción de gases.

2.3.2. Ejemplos de refractómetros

Actualmente se han realizado varias investigaciones y desarrollos tecnológicos en el campo de sensores con fibra óptica motivados principalmente por algunas ventajas que ofrecen éstos como son una mayor sensibilidad, posibilidad de mediciones *in-situ*, inmunidad a interferencias electromagnéticas, entre otras [4]. A continuación se revisarán algunas de las técnicas propuestas recientemente.

Refractómetro de cristal de sílice [11]

El sensor es enfocado a medición del índice de refracción de una sustancia. Consiste en una fibra de cristal de sílice doblada para que adquiera una forma de U con un radio de doblamiento de varios cientos de micrómetros. En la Figura 2.5 se muestra el esquema de la estructura básica del sensor; la idea básica es solo conservar el núcleo de la fibra para que se encuentre en contacto con el medio externo, por lo que el revestimiento de la fibra tiene que ser removido previamente al doblamiento para que adquiera la forma deseada. El núcleo de la fibra (con índice de refracción n_1) y el medio externo (con índice de refracción n_2) forman una guía de onda; por ella viajará el haz de luz siempre y cuando se cumplan las condiciones para reflexión total interna. Como el ángulo crítico en la interfaz esta en función de los índices de refracción de los medios en contacto, la intensidad de luz que se mantiene dentro del núcleo queda asociada al índice de refracción del medio externo (n_2), pues es su índice de refracción quien determina las condiciones de ángulo crítico. Así, el sensor opera como un sensor modulado en intensidad para medición del índice de refracción.

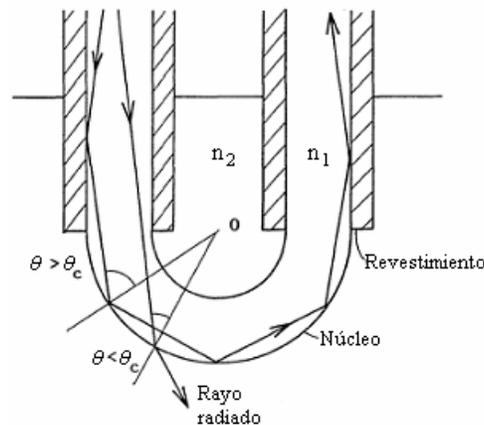


Figura 2.5. Esquema de la estructura del refractómetro de cristal de sílice. [11]

Físicamente en este sensor el doblado no es perfectamente circular, lo que lo hace variar ligeramente de su análisis teórico, sin embargo alcanza resoluciones en la tercera cifra en el índice de refracción, usando un diodo láser de longitud de onda de 780 nm como fuente de luz.

Refractómetro con guía de onda óptica [12]

Este sensor tiene su aplicación para medición del índice de refracción de un medio. El sensor se basa en una guía de onda reflejante antiresonante y usa la fuerte dependencia de la atenuación a variaciones en el índice de refracción de la capa de revestimiento antiresonante como principio para la medición. En esta guía de onda, la luz no está restringida solo por la reflexión interna total, sino también por capas de recubrimiento diseñadas para formar espejos de Fabry-Perot de alta reflectividad. El esquema de la guía de onda se muestra en la Figura 2.6; en la segunda capa, existe un microcanal por donde fluye el fluido actuando como una capa más. Con un adecuado diseño para el índice de refracción n_2 de la segunda capa, las variaciones en el índice de refracción pueden ser detectadas como fuertes variaciones en la óptica de salida. El cambio mínimo en el índice de refracción que puede ser detectado es de 2.4×10^{-4} según resultados de simulaciones numéricas.

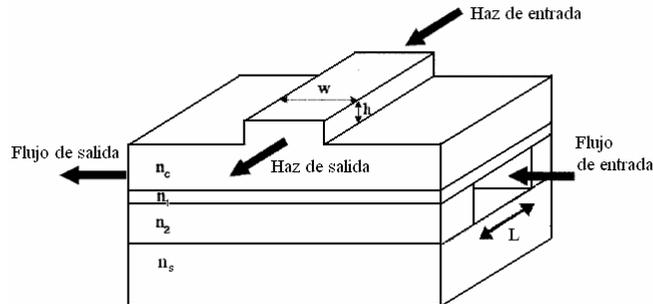


Figura 2.6. Estructura de la guía de onda del sensor; $n_c=n_2=1.45(\text{SiO}_2)$, $n_1=1.97(\text{Si}_3\text{N}_4)$, $n_s=3.47-i2.3 \times 10^{-5}$. [12]

Refractómetro basado en las pérdidas en curvatura de una guía de onda [13]

Este refractómetro tiene como aplicación medir el índice de refracción de líquidos en el rango $1.00 < n < 2.00$. Se basa en la medición de la intensidad de luz que se obtiene al final de la guía de onda doblada, pues está relacionada con el doblez de la guía, así como con la diferencia (el contraste) de los índices de refracción de ésta. La Figura 2.7c muestra la estructura de la guía de onda. Se puede considerar la guía como guía de onda plana obteniendo los índices de refracción efectivos de la guía, con lo que se llega al esquema de la Figura 2.7a. La estructura es tal que el ancho w_b es lo suficientemente grande para que los modos sean guiados solamente por la frontera de medios externa del doblez, lo que se denomina como *whispering gallery mode* (WGM), cuyas pérdidas por esta condición se encuentran definidas teóricamente; dichas pérdidas son función del radio del doblez y del contraste en el índice de refracción ($\Delta N = N_g - N_b$), por lo que la sensibilidad del sensor también dependerá de estos parámetros.

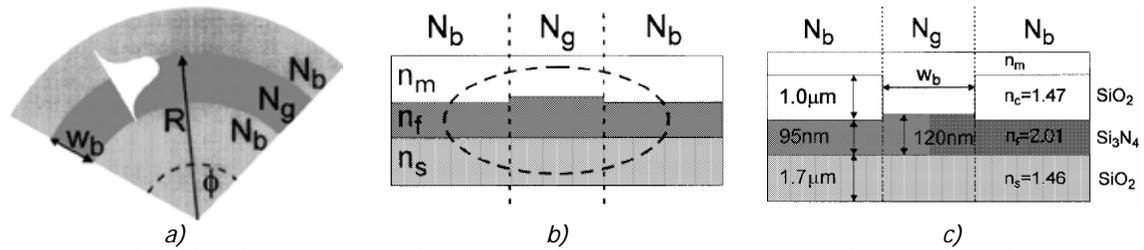


Figura 2.7. a) doblez de la guía de onda con un radio R y un ángulo ϕ , N_g y N_b son índices de refracción relativos. b) vista transversal de la estructura de una guía de onda típica, n_f y n_s , son los índices de refracción de los materiales de la guía de onda, y n_m es el índice de refracción del medio externo. c) vista transversal de la estructura de la guía de onda usada en el sensor. [13]

La estructura de la guía de onda mostrada en la Figura 2.7c presenta la ventaja de que puede ser usada para la medición de índices de refracción pequeños. Debido a que en la guía se requiere contraste en el índice de refracción, esto es, $\Delta N = N_g - N_b$, para poder ser usada bajo el principio de pérdidas por doblez en una guía de onda; una guía convencional como la mostrada en la Figura 2.7b no sería adecuada para ese propósito pues ΔN permanece prácticamente constante: los cambios en los índices efectivos N_g y N_b son muy similares. Es por ello que al usar una guía de onda como en la Figura 2.7c N_b es prácticamente independiente del índice de refracción del medio externo. La máxima resolución alcanzada con el sensor es de $\Delta n_m = 1 \times 10^{-5}$, en un punto de operación de $n_m = 1.37$ dentro del rango de $1.369 < n_m < 1.371$.

Dispositivo pasivo basado en fibra óptica para determinar el índice de refracción de líquidos [14]

Este sensor tiene su aplicación en la medición de índices de refracción de los líquidos y también se basa en la modulación de la intensidad de la luz que viaja por la fibra. La estructura del sensor se muestra en la Figura 2.8; está conformado por una fibra de índice escalonado que se encuentra parcialmente insertada en una placa de resina de poliéster; la placa es de ayuda para el proceso de pulido con el que queda descubierto el núcleo de la fibra. La máxima sensibilidad se obtiene cuando la mitad de la fibra es pulida.

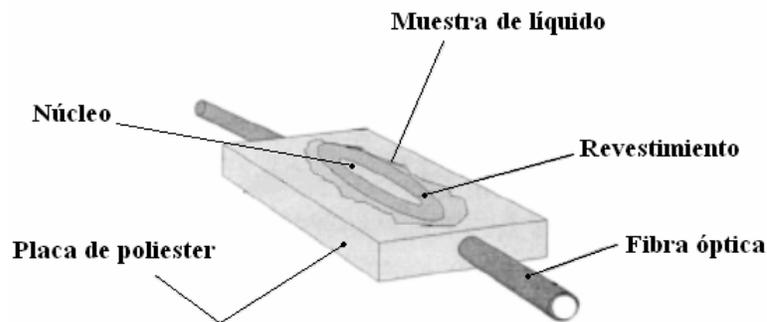


Figura 2.8. Esquema de la estructura del sensor. [14]

El sensor se puede considerar como un sistema de tres capas consistiendo en el núcleo de la fibra óptica, el líquido (del que se quiere determinar el índice de refracción) y el aire. Las pérdidas en la potencia óptica que ocurren en la fibra se deben a efectos de transmisión y reflexión (parcial o total interna) en la interfaz núcleo-líquido o líquido-aire. El funcionamiento del sensor varía con la altura de la capa de líquido, esto es, al tener una delgada capa de líquido depositada sobre el sensor, los rayos reflejados en la interfaz líquido-aire, regresaran al núcleo de la fibra; pero si se tiene una capa gruesa de líquido, causará mayores pérdidas por que la mayoría de los rayos reflejados en la interfaz líquido-aire no regresarán más al núcleo de la fibra. De esta forma, el sensor puede ser usado de dos maneras distintas: sumergiendo todo el dispositivo en el líquido, o solo depositando una gota sobre la superficie pulida. La precisión del sensor es de 2×10^{-3} , usando gotas sobre la superficie pulida, y de 5×10^{-3} sumergiéndolo en el líquido, para índices de refracción de 1.30-1.59 (usando una fibra de $n_{núcleo}=1.492$ y $n_{revest}=1.417$).

2.4. Sensor refractométrico con elemento óptico semiesférico

Este sensor refractométrico es propuesto por Svirid, Khotiaintsev y Swart [1] y es del cual se relaciona este trabajo de tesis; esta constituido por dos fibras ópticas multimodales (emisora y receptora) acopladas mediante una estructura sólida (transparente y dieléctrica) de forma semiesférica y se basa en la modulación de la intensidad de la luz para la detección del índice de refracción de un medio.

El elemento semiesférico empleado en este sensor brinda propiedades de enfoque al usarse en reflexión total interna, lo que propicia a un mejor acoplamiento entre los haces de luz de entrada y salida, y con ello una mejor sensibilidad [1].

2.4.1. Funcionamiento

La base del funcionamiento del sensor son los fenómenos de transmisión y de reflexión que sufre un haz de luz en la frontera de dos medios con índice de refracción diferentes. Primero, el elemento semiesférico (elemento óptico) de detección actúa como elemento transductor, en el que se hace incidir un haz de luz mediante una fibra óptica (emisora). Este haz viaja a través del elemento óptico hasta la frontera entre éste medio y el externo, donde, por reflexión y refracción, existirá cierta potencia de luz incidente que será transmitida y los rayos de luz que incidan en la superficie del elemento óptico, de tal forma que su ángulo de incidencia sea tal que cumpla con reflexión interna total, serán reflejados dentro del elemento óptico. Esta porción del

haz de luz que es reflejada, sigue su trayectoria repitiendo el mismo proceso hasta que incide sobre la fibra óptica receptora. Como se muestra en la Figura 2.9, las fibras ópticas se encuentran sobre un mismo eje y son equidistantes al centro del elemento óptico.

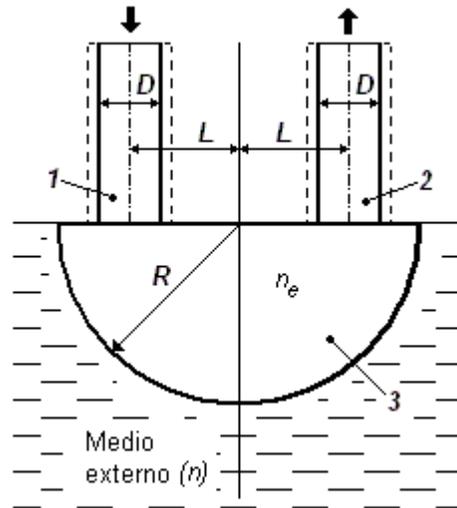


Figura 2.9. Esquema del sensor refractométrico con elemento esférico: 1- fibra óptica de entrada (emisora), 2- fibra óptica de salida (receptora), 3-elemento esférico.

La cantidad de potencia óptica que llega a la fibra receptora se encuentra en función por una parte del índice de refracción del medio externo, ya que de él dependen las condiciones para reflexión total interna, y por otro lado de la posición L que determina el acoplamiento entre las fibras ópticas. En una aplicación real del sensor, la variación proviene del medio externo, es más, lo que se busca es la medición de este, ya que las fibras estarían fijas al elemento óptico semiesférico. Se sabe que la modificación de la posición de las fibras ópticas nos permite variar el rango de índices de refracción que pueden ser medidos con el sensor, por lo que en esta etapa experimental es de gran importancia tener un control sobre la posición de las mismas para, de esta forma, asociar esta con los cambios producidos en la respuesta del sistema con las sustancias que se utilizarán como medio externo al elemento óptico.

Para llevar a cabo el estudio del sensor, es necesario definir parámetros sobre las características físicas del sensor así como sobre características de su funcionamiento respecto a la intensidad óptica.

Sobre las características físicas, resulta útil trabajar con parámetros adimensionales con el fin de que mediante el modelo experimental a gran escala se

pueda generalizar el comportamiento del sensor refractométrico sin importar sus dimensiones físicas reales. De esta manera, las dimensiones físicas del sensor se refieren al radio R de la semiesfera usada como elemento óptico, teniendo así dos parámetros adimensionales:

$$\Phi = \frac{D}{R} \quad (2.5)$$

$$\Lambda = \frac{L}{R} \quad (2.6)$$

Respecto a la intensidad óptica, es posible definir la *transmisión* como una relación entre la intensidad óptica de salida y la intensidad óptica de entrada del transductor como función del índice de refracción del medio externo, definida como

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (2.7)$$

siendo I_1 la intensidad óptica de entrada al transductor, es decir, la intensidad óptica que entra al elemento óptico por la fibra emisora, e $I_2(n)$ la intensidad óptica de salida, esto es, la aceptada por la fibra receptora; ésta última intensidad óptica es función del índice de refracción n del medio externo.

El parámetro de transmisión puede ser expresado también en decibeles:

$$T(n)(dB) = 10 \log_{10} T(n) \quad (2.8)$$

Ahora, se define la transmisión relativa como

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{aire}} = \frac{\frac{I_2(n)}{I_1}}{\frac{I_{2aire}}{I_1}} = \frac{I_2(n)}{I_{2aire}} \quad (2.9)$$

siendo T_{aire} e I_{2aire} la transmisión del transductor y la intensidad óptica de salida, respectivamente, cuando el medio externo es aire. Hacer relativa la transmisión a la que se tiene cuando el medio externo es el aire, permite excluir las pérdidas intrínsecas al funcionamiento del sistema y que no dependen del fluido que se tenga como medio externo; por lo que, la transmisión relativa $T^*(n)$ muestra solo los efectos asociados al medio externo (a su índice de refracción). Por esta razón resulta en conveniente en ocasiones usar la transmisión relativa para estudiar experimentalmente las características del transductor.

La transmisión relativa también puede ser expresada en decibles:

$$T^*(n)(dB) = 10\log_{10} T^*(n) \quad (2.10)$$

2.4.2. Características de transmisión

Este sensor refractométrico que usa un elemento semiesférico ha sido analizado en el trabajo de Svirid et al. [1] mediante simulaciones numéricas para conocer su comportamiento; para ello evaluaron la transmisión $T(n)$ del transductor empleando modelo matemático de tres dimensiones y realizando numéricamente el trazado de rayos. El modelo toma en cuenta la posición de las fibras ópticas, el diámetro del núcleo de las fibras, y la divergencia del haz; además, se supone una distribución de luz uniforme del haz de luz (monocromática, no polarizada y no coherente) formado por 100 000 rayos. Con este modelo teórico se consideran las múltiples reflexiones con la superficie semiesférica que pueda sufrir el haz de luz en su trayectoria, calculándose en cada punto de reflexión el coeficiente de reflexión de Fresnel y la intensidad resultante de cada rayo. Así, dependiendo de los parámetros de apertura lineal y angular de las fibras, una determinada cantidad de rayos llegaran al núcleo de la fibra receptora, e integrando la contribución de cada rayo, se obtiene la transmisión $T(n)$.

Como primera aproximación para estudiar el comportamiento del sensor, en el trabajo de Svirid et al.[1] se simuló primeramente la superficie semiesférica suponiéndola totalmente reflejante, calculando la transmisión en función de la posición relativa de las fibras bajo diferentes combinaciones de parámetros con el fin de observar las propiedades de reflexión del elemento semiesférico. La Figura 2.10 muestra las curvas obtenidas, de donde se observan zonas de transmisión correspondientes a picos en la transmisión (acoplamiento de las fibras); alcanzan

mayores niveles en la transmisión y están mejor definidos cuando el valor de Φ es pequeño, pero mientras Φ aumenta tienden a unirse estas zonas de transmisión pico.

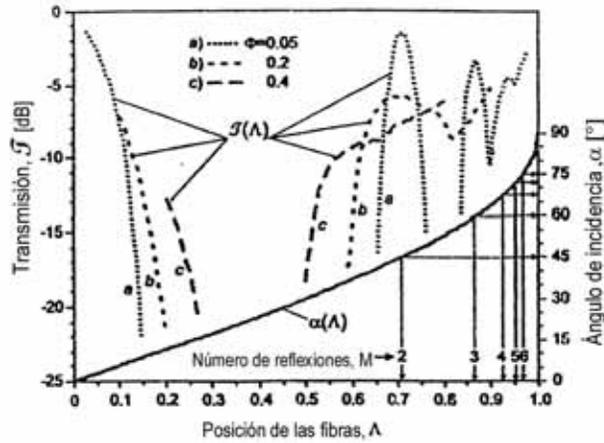


Figura 2.10. Transmisión T contra Λ , para el caso ideal de la superficie semiesférica totalmente reflejante, con $AN=0.2$ y: a) $\Phi=0.05$, b) $\Phi=0.2$ y c) $\Phi=0.4$. Además se muestra el ángulo de incidencia de un rayo axial contra Λ , y el número de reflexiones M . [1].

El acoplamiento de las fibras ocurre bajo algún número entero de serie de reflexiones M sobre la superficie semiesférica y la orientación paralela del haz de entrada y el de salida. La Tabla 2.1 contiene los puntos de acoplamiento considerando un rayo axial a la fibra.

A partir de la segunda zona de transmisión ($M=2$), se presenta un ángulo de incidencia que con el que se puede tener reflexión total interna ($40^\circ < \text{ángulo crítico} < 90^\circ$), lo cual resulta de interés para la aplicación prácticas del sensor, esto es, para la detección del índice de refracción por la modulación de la amplitud. La Figura 2.11 muestra los resultados de la simulación de la transmisión relativa T^* hecha por Svirid et al. [1] del modelo completo del sensor cuando se varía el índice de refracción del medio externo, con lo que se observa la sensibilidad del sensor a dicho cambio.

Λ	Ángulo de incidencia del rayo axial	Número de reflexiones M (zonas de transmisión)
0	0°	1
0.707	45°	2
0.866	60°	3
0.924	67.5°	4
0.951	72°	5
0.966	75°	6
0.975	77.14°	7
0.981	78.75°	8

Tabla 2.1. Número de reflexiones M de un rayo axial sobre la superficie semiesférica totalmente reflejante, junto con su ángulo de incidencia y la posición L de las fibras correspondiente.

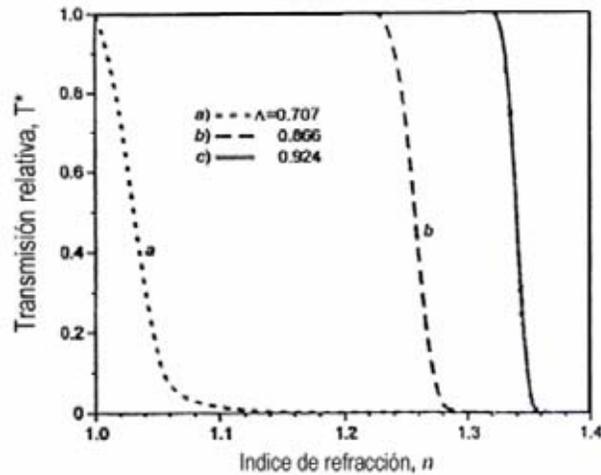


Figura 2.11. Transmisión relativa contra índice de refracción del medio externo n . Posición de la fibra: a) $\Lambda=0.707$, b) $\Lambda=0.866$ y c) $\Lambda=0.924$; con $AN=0.2$ y $\Phi=0.05$. [1].

2.5. Conclusiones

Los sensores basados en el uso de fibras ópticas han tenido en los últimos años una gran penetración en el campo industrial debido a que poseen ventajas inherentes como su tamaño pequeño, inmunidad a interferencia electromagnética, posibilidad de medición remota e *in-situ*, alta sensibilidad y amplio ancho de banda, que los han convertido en dispositivos de medición muy competitivos con los sensores tradicionales ya existentes.

Existen diferentes técnicas usadas para medir un fenómeno determinado con los sensores de fibra óptica. La más evidente, y en varios casos la más práctica, es que el fenómeno a medir module de alguna manera la intensidad de la luz, y relacionar dichos cambios con el medio externo. Sin embargo, prácticamente cualquier otro parámetro de la luz como la fase, la longitud de onda o la polarización, puede ser usado para medir un fenómeno con una apropiada instalación.

Dentro de la vasta gama de sensores en fibra óptica, se encuentran los dedicados a la refractometría, a pesar de que se utilizan distintas técnicas, la de modulación de la intensidad de la luz es muy recurrida. De este tipo de refractómetros, el refractómetro de elemento óptico semiesférico presenta ventajas como el acoplamiento eficiente entre los haces de luz debido a la geometría de su superficie, con lo que se obtiene mejor sensibilidad a cambios en el índice de refracción, y la posibilidad de medir diferentes rangos de índices de refracción con diferentes

posiciones relativas de las fibras. Sin embargo, los resultados teóricos existentes sobre este tipo del sensor no toman en cuenta varios factores que se encuentran en situaciones reales que puedan distorsionar y alterar el funcionamiento del sensor. Por ello, surge la necesidad de realizar la investigación experimental de este sensor refractométrico, con lo cual es necesario implementar una instalación experimental con las características adecuadas para realizar dicha investigación.

3. Instalación Experimental

3.1. Introducción

En esta sección se describe la instalación experimental implementada para realizar mediciones con un modelo a gran escala del sensor y que fue implementada en conjunto con los integrantes que participan también en el proyecto del sensor refractométrico. La ventaja que ofrece trabajar con un modelo a gran escala es que ofrece ayuda principalmente para la precisión en todos los aspectos mecánicos y de medición espacial, y que resultaría muy complicado de trabajar en esta etapa experimental directamente con el sensor real. Además, al usar dimensiones relativas, los resultados usando éste modelo a gran escala pueden aplicarse a modelos similares cuyas dimensiones físicas sean distintas, siempre y cuando la relación entre sus dimensiones se conserve.

La Figura 3.1 muestra el esquema simplificado de la instalación experimental del sensor refractométrico. La instalación experimental puede ser clasificada como:

- Subsistema mecánica, que se refiere a todos los dispositivos que funcionan como soporte físico, tales como mesas de desplazamiento triaxial o soportes de de las fibras ópticas.
- Subsistema óptico, que se refiere a aquellos dispositivos que tienen relación con la operación óptica del sistema como lo son la fuente de luz, el fotodiodo, las fibras ópticas o el elemento semiesférico.

- Subsistema eléctrico, que se refiere al circuito fotoreceptor usado en la instalación experimental para la detección de la señal óptica en la fibra de salida.
- Adquisición de datos, referida a los programas realizados en la PC para la comunicación PC-Osciloscopio para la adquisición de los datos medidos.

Cada de una de las partes de la instalación experimental son comentadas a continuación.

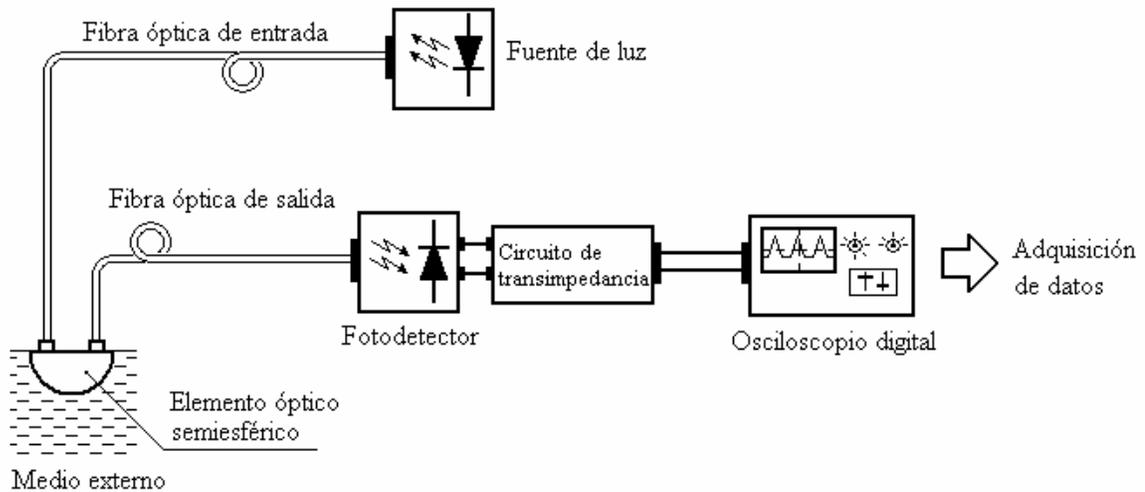


Figura 3.1. Esquema simplificado de la instalación experimental para el sensor refractométrico.

3.2. Subsistema mecánico

Para conocer experimentalmente la respuesta del sensor en esta etapa experimental es necesario contar con la movilidad de las fibras, por lo que se debe de tener el mayor control de sus posiciones, especialmente de la distancia que existe entre éstas y el centro del elemento óptico.

Primeramente, se cuenta con una mesa de trabajo óptico ThorLabs PBI51505 en la que se encuentran fijados todos los dispositivos mecánicos con seguridad. Sobre ésta mesa están colocadas dos mesas de movimiento triaxial de precisión ThorLabs PT3, que permiten el movimiento en tres ejes (x, y y z , ortogonales entre sí) y cuentan con una precisión de 0.01mm para desplazamientos sobre cada uno de éstos; a dichas mesas se encuentran colocados los brazos metálicos que sujetan la fibra sobre el elemento óptico semiesférico. Sin embargo, para facilitar la lectura de los datos se cuenta con medidores auxiliares de desplazamiento en un eje, con una resolución también de 0.01 mm.

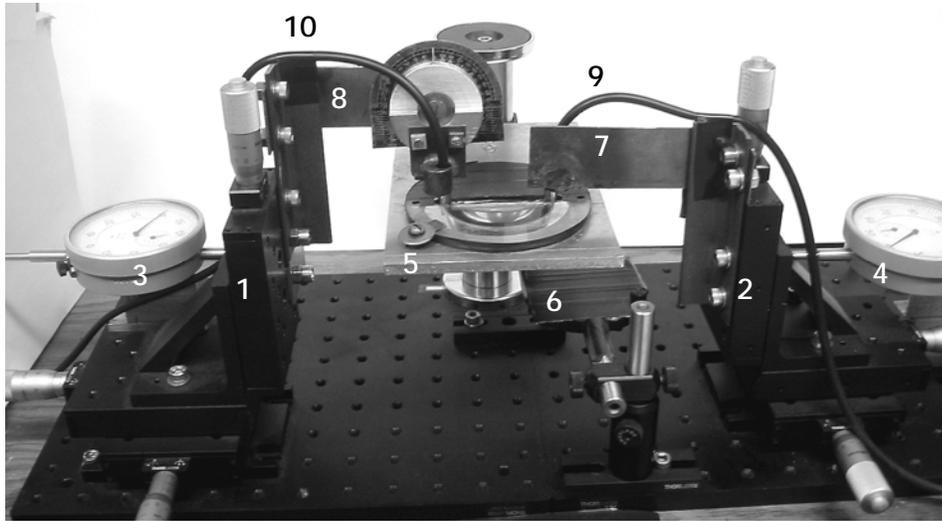


Figura 3.2. Dispositivos mecánicos y soportes. 1,2-Mesas de movimiento triaxial, 3,4-Medidores de desplazamiento, 5-Plataforma para soporte del elemento óptico, 6-Plataforma móvil para colocar muestras de líquido, 7,8-Brazo metálico para sujetar las fibras.

Como soporte para el elemento óptico, se cuenta con una plataforma metálica dónde se monta éste, quedando en una posición horizontal y permitiendo que sobresalga por debajo. Una segunda plataforma móvil es usada para colocar un contenedor para las muestras de líquido y ajustarlo de tal forma que la semiesfera quede totalmente sumergida en la muestra. En la Figura 3.2 se muestra la parte mecánica en conjunto.

3.3. Subsistema óptico

3.3.1. Fotodiodo

El fotodiodo usado en el experimento fue facilitado en el laboratorio; cuenta con un área fotosensible relativamente amplia: 25.3mm^2 , pero no se cuentan con especificaciones sobre éste.

Parámetros como su capacitancia y su resistencia dinámica, son de importancia ya que los efectos de éstos se ven reflejados en la respuesta en frecuencia del circuito fotoreceptor en el que se utilice.

Conjuntamente con el desarrollo de las pruebas del circuito detector (comentado posteriormente), se utilizaron simulaciones en el programa PSpice del circuito, su análisis y la respuesta en frecuencia experimental para tener una aproximación de los valores de capacitancia (C_d) y resistencia dinámica (R_d) del fotodetector. La Tabla 3.1 muestra los valores obtenidos; realizando la simulación para la obtención de la respuesta en frecuencia del circuito, se obtuvieron resultados similares a los obtenidos

experimentalmente con respecto a la respuesta en frecuencia del circuito fotoreceptor, lo que los valores obtenidos son muy cercanos a los que realmente le corresponden.

Parámetro	Valor
C_d	660 pF
R_d	476 kΩ

Tabla 3.1. Valores de capacitancia y resistencia dinámica obtenidos para el fotodiodo utilizado.

Por otra parte, tampoco se contaba con especificaciones del fotodiodo sobre la longitud de onda en la cual es más sensible, por lo que se realizaron pruebas con cuatro LEDs que solo diferían en la longitud de onda de su pico de emisión, esto para conocer cualitativamente el rango aproximado de longitudes de onda en que es más sensible. Los LEDs se excitaron con la misma señal alterna, colocándolos a 1 cm de la región fotosensible del fotodiodo. Para el fotodiodo se usó en una configuración fotoconductiva. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.2 y, para el fin, son cualitativos, ya que solo es de interés conocer alrededor de qué región del espectro tiene mayor sensibilidad el fotodetector. La región infrarroja resultó ser la de mayor sensibilidad.

Parámetro \ LED	Blanco	Azul ($\lambda = 470 \text{ nm}$)	Rojo ($\lambda = 635 \text{ nm}$)	Infrarrojo ($\lambda = 940 \text{ nm}$)
Corriente pico-pico de excitación al LED	38.36mA	38.36mA	38.36mA	38.36mA
Voltaje pico-pico a la salida del circuito fotovoltaico	25 mV	-	80 mV	650 mV
Voltaje de ruido	15 mV	15 mV	15 mV	15 mV
S/R	1.666	-	5.333	43.333

Tabla 3.2. Respuesta del fotodiodo para distintas longitudes de onda

3.3.2. Fuente de luz

En este sistema, debido a que el funcionamiento del sensor esta basado en la modulación de la intensidad de la radiación óptica y no interesa en este caso polarización, coherencia o ancho espectral reducido, se eligió como fuente de radiación un LED que ofrece un bajo costo, potencia óptica prácticamente lineal a la corriente de alimentación, una vida útil larga, demanda poca potencia para su funcionamiento, y usa circuitos de polarización simples [6].

Entonces, ya que el fotodiodo presentó mayor sensibilidad en la zona de longitud de onda correspondiente al infrarrojo, el LED elegido como fuente de luz tiene su pico de emisión en esa zona del espectro. El LED es de GaAIAs marca Everlight modelo

IR333C/H0/L10 con un diámetro de encapsulado de 5 mm; su pico de emisión corresponde a la longitud de onda $\lambda = 940\text{nm}$, con un ancho espectral de 45nm y un ángulo de divergencia $2\theta = 40^\circ$ [18], como se muestra en la Figura 3.3.

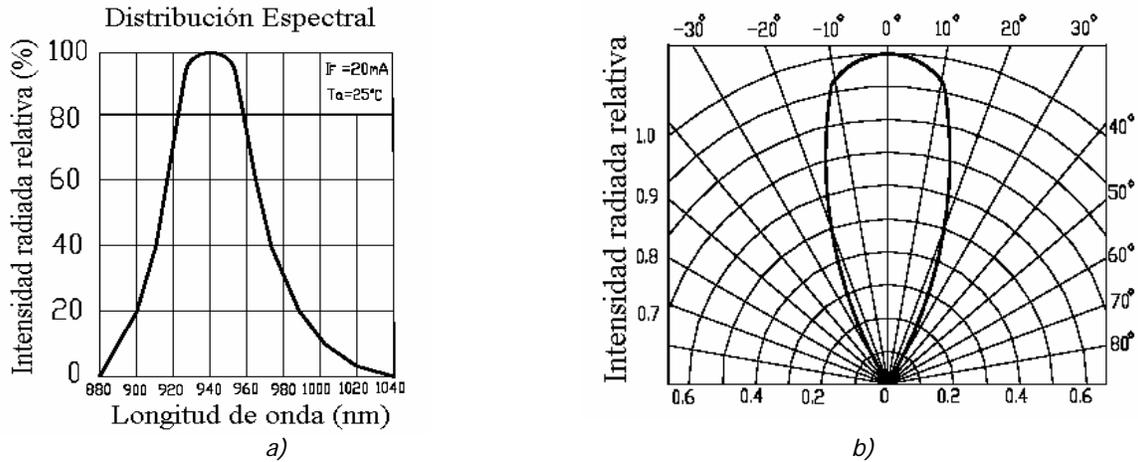


Figura 3.3. (a) Espectro de emisión y (b) patrón de radiación del LED empleado. [18]

El LED es polarizado mediante un circuito simple mostrado en la Figura 3.4 que usa un generador de señales marca Stanford Research Systems modelo DS345; se alimenta con una señal de alterna triangular cuya corriente pico es 13.3 mA y a una frecuencia de 100Hz. La ventaja de utilizar una señal alterna es que la luz ambiental, a la que puede considerarse como de intensidad constante, que ingrese a la fibras o al elemento óptico no influye en las mediciones, asociando los cambios de la señal al funcionamiento del sensor por variaciones del en el índice de refracción del medio externo.

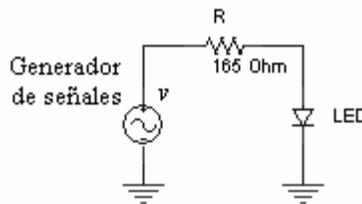


Figura 3.4. Circuito de polarización ocupado para alimentar al LED.

Mediante un soporte mecánico fijo, el LED es colocado frente a la cara de la fibra a una distancia de 80 mm de ésta con el propósito de que se esté trabajando en el campo lejano de emisión del LED. De esta manera, los haces que son aceptados por el núcleo de la fibra óptica entran con un ángulo de incidencia menor que si el LED estuviera contiguo a la cara de la fibra.

3.3.3. Fibras ópticas

Las fibras usadas en la parte experimental están construidas a su vez de un conjunto de fibras de vidrio de menor tamaño, y con una máscara en el extremo para limitar el área transversal en las caras de la fibra.

Se realizaron medidas, con ayuda de un microscopio, de las caras de las fibras ópticas emisora y receptora para obtener las dimensiones físicas del diámetro de sus respectivos núcleos; los resultados se muestran en la Figura 3.5. Para la fibra emisora (fibra 1) se observó que la máscara prácticamente es redonda; para la fibra receptora (fibra 2), se observó que la máscara es elipsoidal.

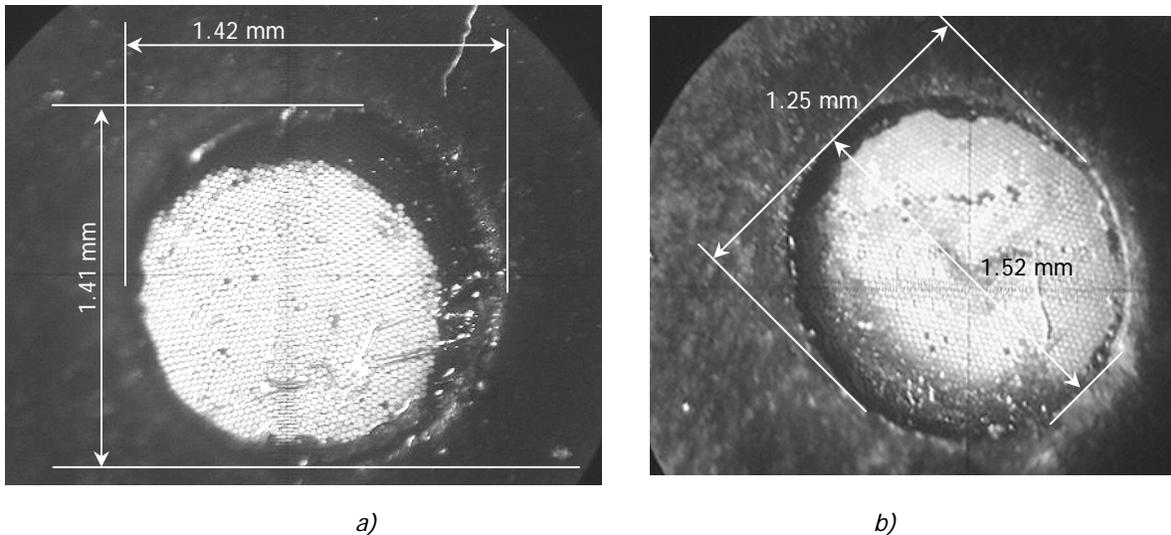


Figura 3.5. a) Detalle de la cara de la fibra 1 siendo iluminada en el extremo opuesto. b) Detalle de la cara de la fibra 2 siendo iluminada en el extremo opuesto.

Caracterización de las fibras ópticas y patrones

Para la fibra óptica emisora, se midió el patrón de salida (cono de luz) que presenta cuando el extremo opuesto es expuesto a la fuente de emisora (LED infrarrojo) a 80mm, dejando la fibra fija y variando, con ayuda de un goniómetro, la posición del fotodetector como se muestra en el esquema de la Figura 3.6.

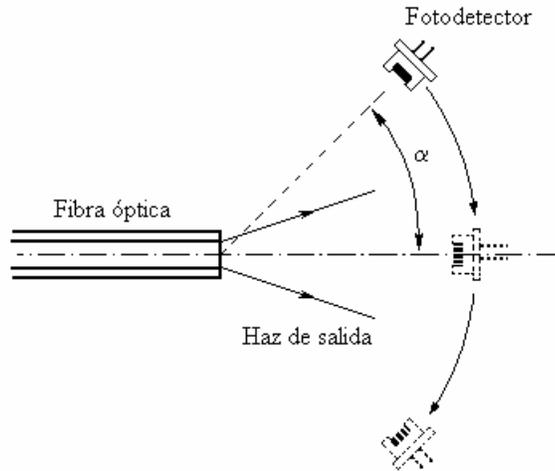


Figura 3.6. Esquema de la medición del patrón de salida de la fibra 1 (fibra emisora). Se varía el ángulo α con ayuda de un goniómetro para desplazar al fotodetector.

Dado que las dimensiones diametrales de la fibra óptica no corresponden a una forma circular exacta, presentando una forma elipsoidal, se decidió considerar en el método de medición la variación de la posición proporcionando un giro sobre el eje de la fibra óptica, obteniendo patrones para la posición a 0° (posición 1) y 90° (posición 2).

Los patrones de salida obtenidos para dichas posiciones se muestran en la Figura 3.7.

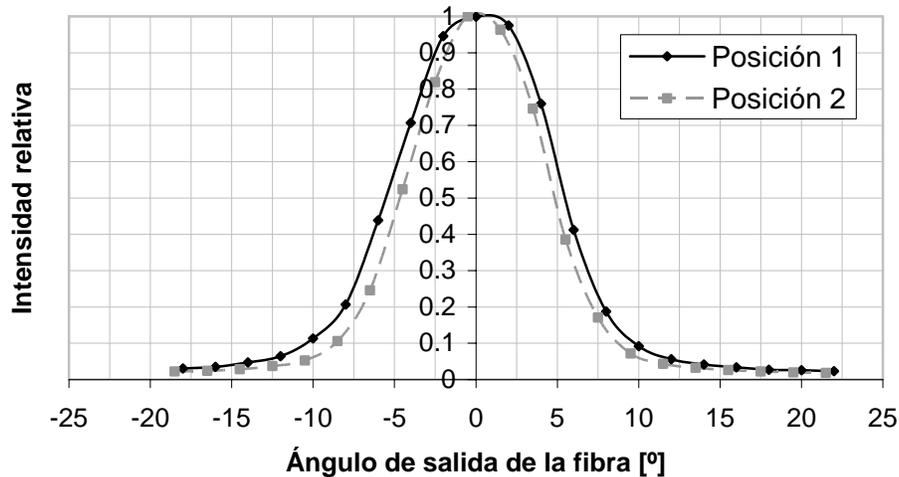


Figura 3.7. Patrón de salida de fibra 1 (emisora) para cada posición de la fibra respecto a su eje.

Como se puede observar, la variación de la posición respecto al eje de la fibra óptica influye en la apertura del cono de luz que se hace incidir en el elemento

óptico. La Tabla 3.3 muestra el ángulo promedio para la intensidad óptica relativa de 0.5 a la salida de la fibra emisora.

Posición	Ángulo promedio a 50% de intensidad óptica
0° (Posición 1)	5.5°
90° (Posición 2)	4.7°

Tabla 3.3. Ángulos promedios del haz de salida para la fibra emisora

En el caso de la fibra 2 (fibra receptora), como es mostrado en la Figura 3.8, se determina el patrón de entrada fijando la fibra óptica y desplazando en forma angular al LED con ayuda de un goniómetro. Al otro extremo se encuentra el fotodetector cuya superficie fotosensible cubre por completo la cara de la fibra.

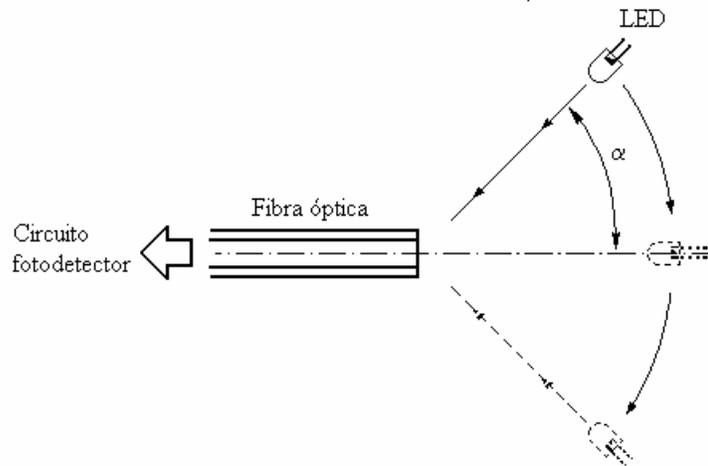


Figura 3.8. Esquema de la medición del patrón de entrada de la fibra 2 (fibra receptora). Se varía el ángulo α con ayuda de un goniómetro para desplazar al LED.

De la misma forma que para la fibra óptica emisora, se obtuvieron los patrones de entrada de la fibra receptora para 2 posiciones (a 0 y 90°) respecto al eje de la fibra óptica. Las gráficas obtenidas se muestran en la Figura 3.9.

Dado que la característica no corresponde a una fibra con perfil de índice escalonado ni a una fibra con perfil de índice graduado, la determinación de la apertura numérica se estableció en 2 parámetros: apertura numérica efectiva y apertura numérica máxima.

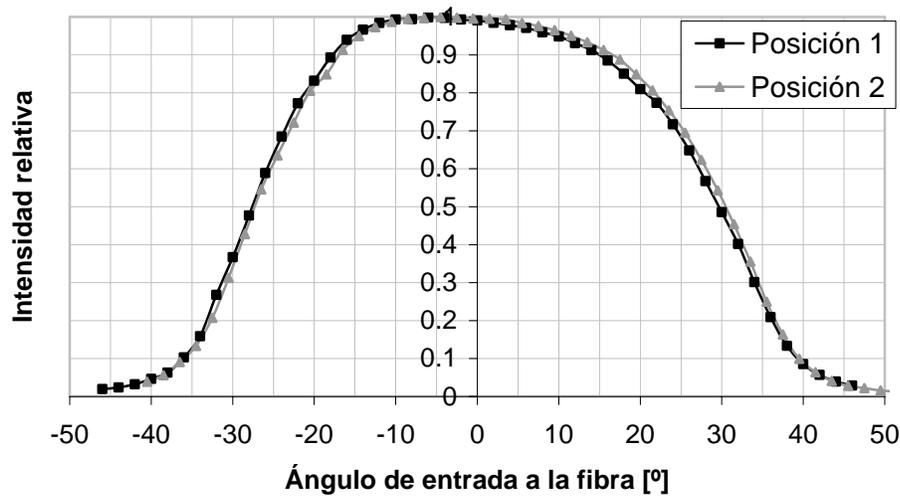


Figura 3.9. Patrón de entrada de la fibra 2 para las dos posiciones 0 y 90°.

La apertura numérica efectiva quedará determinada por el ángulo donde la potencia sea la mitad del máximo relativo, es decir para intensidad de 0.5. La apertura numérica máxima la determinamos como el ángulo donde la potencia es el 5% de la intensidad óptica máxima. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.4.

Apertura	Apertura Angular	
	Posición 1 (0°)	Posición 2 (90°)
Máxima (a 5 %)	41°	40.7°
Efectiva (a 50%)	28.6°	29°

Tabla 3.4. Valores de apertura angular de la fibra receptora.

3.3.4. Elemento semiesférico de detección

El elemento semiesférico de detección en el modelo real se prevé hecho de un solo material, con las fibras ópticas en contacto íntimo. Sin embargo, por facilidad de fabricación y para fines de ésta etapa experimental, para el modelo a gran escala se usó una semiesfera de paredes delgadas de vidrio de borosilicato (Pirex; $n = 1.47$ a $\lambda = 633$ nm), similar al arreglo utilizado por Svirid et al. [1]. El espesor de sus paredes es de 1.2 mm y tiene un radio externo de 30 mm, y además cuenta con un anillo de acrílico adherido que funciona como soporte para colocarla en su plataforma. La estructura es llenada con glicerina cuyo índice de refracción semejante a las paredes del vidrio, y las fibras son colocadas sobre la estructura semiesférica en contacto directo con la glicerina.

3.4. Subsistema eléctrico

3.4.1. Circuito fotoreceptor

El circuito fotoreceptor para esta aplicación es deseable que presente una alta ganancia y una respuesta lineal. Las pruebas realizadas fueron hechas directamente con el dispositivo experimental; con base en los resultados de las simulaciones [1], se eligió la cuarta zona de transmisión para realizar las pruebas, considerando que alrededor de esta zona comienzan a presentarse condiciones de transmisión cuando el medio externo es el agua.

Se realizaron primeramente pruebas con circuitos simples, como el fotovoltaico, pero no se logró detectar señal a la salida del sensor. Se usa, entonces, una configuración con amplificador operacional de transimpedancia [10], mostrado en la Figura 3.10; además, para reducción de interferencia electromagnética, el circuito fue blindado mediante una caja metálica conectada a tierra física. El circuito es polarizado utilizando pilas alcalinas.

Se eligió trabajar con un amplificador operacional considerando características como la ganancia en lazo abierto, bajo ruido, impedancia de entrada alta, razón de rechazo al modo común alto, y niveles bajos de corriente en las entradas del amplificador, escogiéndose el amplificador elegido fue el LF356N de National Semiconductor.

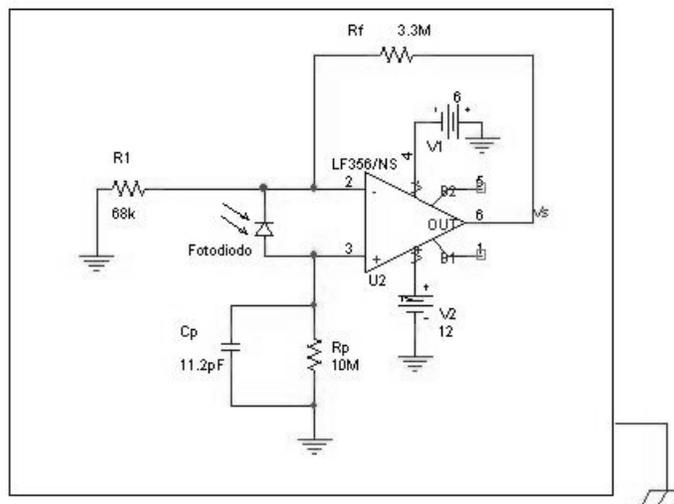


Figura 3.10. Circuito fotoreceptor implementado.

Para baja frecuencia (considerando que el amplificador operacional como ideal), se puede demostrar que la función de transferencia del circuito es:

$$\frac{v_s}{i_p} = R_p \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) + R_f \quad (3.1)$$

Así, aplicando la ecuación 3.1, la ganancia (G_0) teórica para baja frecuencia es de $488.59 \times 10^6 [V/A]$

Para indagar sobre la respuesta en frecuencia del circuito, es necesario realizar la sustitución del fotodiodo ideal por un modelo que permita analizar el comportamiento en frecuencia del circuito. Además de la representación del fotodiodo como una fuente de corriente, se deben tomar en cuenta los efectos de la capacitancia del fotodiodo C_d y la resistencia dinámica R_d . El circuito equivalente se muestra en la Figura 3.11.

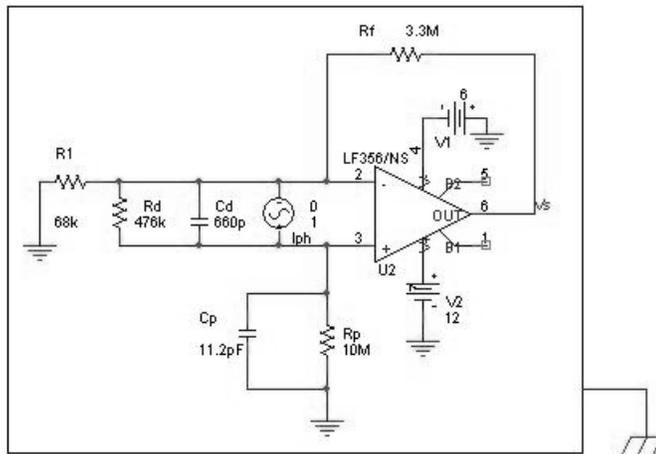


Figura 3.11. Circuito fotoreceptor con el modelo equivalente del fotodiodo, donde C_d es la capacitancia del fotodiodo, y R_d su resistencia dinámica.

El circuito es simulado con el programa PSpice y midiendo experimentalmente su respuesta en frecuencia. Las gráficas obtenidas se muestran en la Figura 3.12. En ambos casos se tiene una respuesta en frecuencia paso bajas. En la simulación, la ganancia (G_{max}) en baja frecuencia que presenta el circuito es de $496 \times 10^6 [V/A]$; la frecuencia de corte se presenta a 2.20 kHz, mientras que con los datos experimentales se tiene a 2.250 kHz.

A la salida del circuito fotoreceptor es medido el nivel de ruido con ayuda del osciloscopio. En la Figura 3.13 se muestran dos oscilogramas tomados a la salida del circuito fotodetector, sin señal óptica incidente, con distintas condiciones de polarización: la Figura 3.13a muestra la salida que se obtiene sin polarizar el circuito, esto es, $V_+ = V_- = 0$; y la Figura 3.13b la salida cuando se polariza el circuito con $V_+ = 12V$ y $V_- = -6V$. La Tabla 3.5 muestra los valores de voltaje pico a pico de la señal medida en cada caso.

Condición	Voltaje pico-pico [mV]
Circuito sin polarizar	1 - 2
Circuito polarizado	6 - 10

Tabla 3.5: valores pico a pico del ruido para cada uno de los casos.

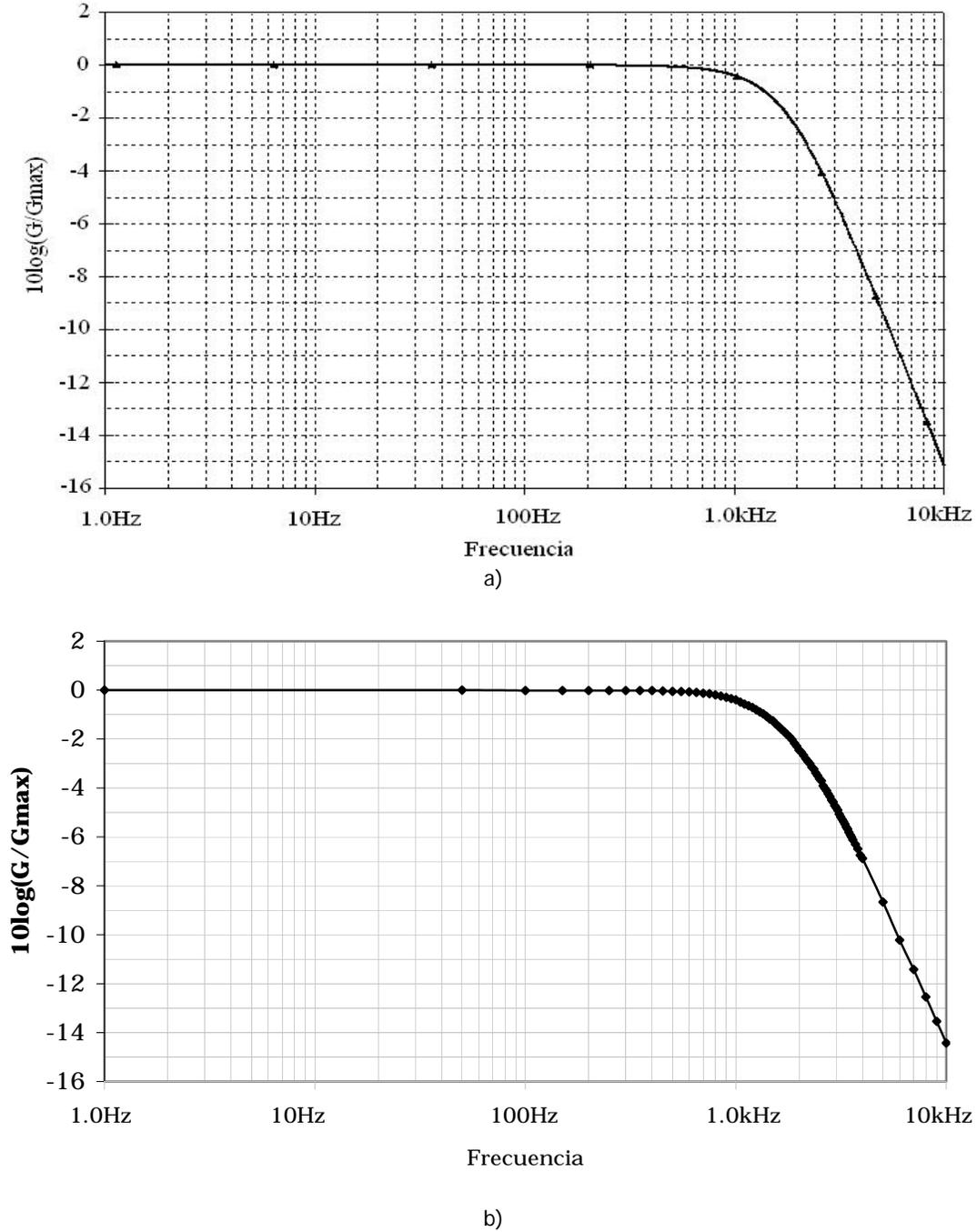


Figura 3.12. Respuesta en frecuencia del circuito fotoreceptor; a) simulación del circuito mediante el programa PSpice; b) mediciones experimentales.

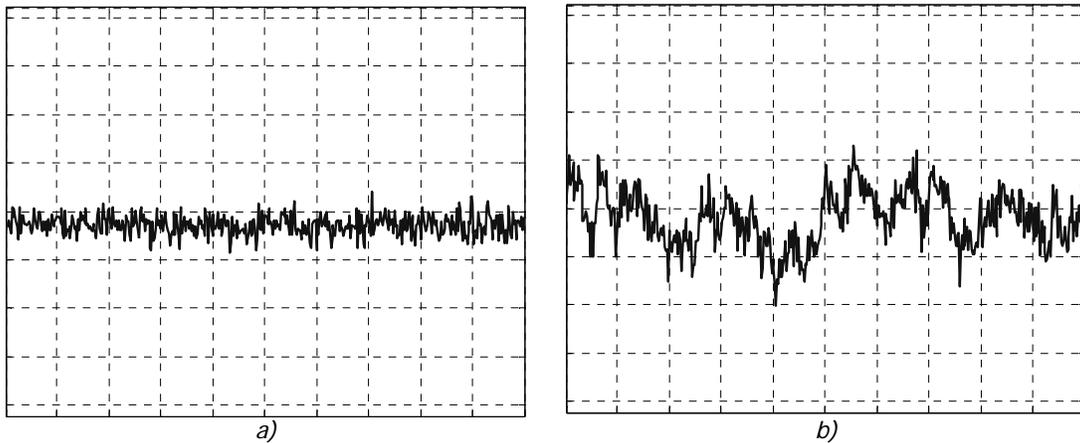


Figura 3.13. Oscilograma medido a la salida circuito (a) sin polarizar y (b) polarizado con $V' = +12V$ y $V = -6V$. Para ambos casos: escala horizontal 2ms/div, escala vertical 2mV/div.

De los voltajes pico-pico de la Tabla 3.5, se tiene una diferencia de aproximadamente 7 [mV] que se puede atribuir al ruido que es adicionado por el circuito fotoreceptor. El voltaje de ruido que se obtiene cuando se polariza el circuito define la señal mínima detectable; para propósitos experimentales se puede considerar que las señales detectables sean tales que presenten una relación $S/R \geq 2$. El rango dinámico del circuito amplificador resulta de 550.

3.5. Adquisición de Datos

La señal de salida del fotoreceptor es analizada mediante un osciloscopio digital Gould 475 Digital Storage Oscilloscope BW 200 MHz. La ventaja que ofrece éste es que brinda la posibilidad de adquirir datos de la señal que se está midiendo, como voltaje pico-pico o frecuencia, hacia una PC para almacenarlos y efectuar procesamientos posteriores con ellos.

La comunicación entre la PC y el osciloscopio digital se lleva a cabo mediante el puerto serial de la PC al puerto RS232 del osciloscopio (Figura 3.14). Los programas desarrollados fueron realizados en MatLab, y con un enfoque hacia la medición del voltaje pico a pico de la señal que entrega el circuito fotoreceptor. A continuación se describen los programas realizados para las diferentes aplicaciones en que se realizaron mediciones. En la sección de Apéndices se muestra el código fuente de cada programa.

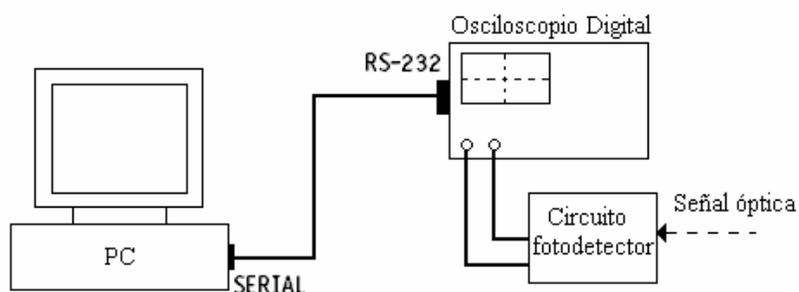


Figura 3.14. Esquema de adquisición de datos: del puerto Serial (PC) al RS-232 del osciloscopio digital

Programa: INI_COM1

Este programa es utilizado para inicializar el puerto serial de la computadora, es decir, se definen los parámetros del puerto serial (baudrate, tamaño del buffer) para que la PC pueda establecer una comunicación con el osciloscopio digital a través del dicho puerto. Además, una vez establecidos los parámetros, realiza una prueba de comunicación mandando una petición de identificación al osciloscopio, el cual reenvía a la PC información sobre el modelo del osciloscopio y el número de versión del software que tiene instalado. Este programa debe ser ejecutado antes de cada sesión de medición para que los demás programas puedan comunicarse con el osciloscopio.

Programa: PTP01

Este programa fue realizado para la medición de la apertura angular de las fibras ópticas. En caso de que se desee guardar las mediciones en un archivo, el nombre de éste es pedido al inicio del programa. Se pide al usuario el número de lecturas, y el tiempo entre éstas, de las cuales se realizará un promedio para obtener una medición. A un ángulo dado, hay un proceso de petición al osciloscopio del valor de voltaje pico a pico de la señal que esta siendo medida; los datos son guardados (en un archivo de Excel) inmediatamente después de cada medición.

Programa: PTP02

El programa es desarrollado para mediciones donde el medio externo se mantiene constante y es necesario realizar un barrido de las posiciones relativas de las fibras ópticas. En caso de que se desee guardar las mediciones en un archivo, el nombre de éste es pedido al inicio del programa. Se pide al usuario el número de lecturas, y el tiempo entre éstas, de las cuales se realizará un promedio para obtener una medición; posteriormente se pide al usuario la posición en que se encuentran las fibras (obtenida con medidores de desplazamiento de precisión), y después se lleva a cabo el proceso de petición al osciloscopio del valor de voltaje pico a pico de la señal que esta siendo

medida; los datos son guardados (en un archivo de Excel) inmediatamente después de cada medición.

Programa: PTP03

En este programa se supone que las mediciones se realizaran para una posición fija de las fibras ópticas; así, esta enfocado hacia las mediciones donde se cambia el medio externo, pero realizando pares de mediciones líquido-aire. En caso de que se desee guardar las mediciones en un archivo, el nombre de éste es pedido al inicio del programa. Se pide el número de lecturas (voltaje pico-pico) a tomar para realizar el promedio de éstas y obtener una medición del fluido que se este en turno(aire o líquido), los segundo entre cada uno de éstas, y el número de mediciones, es decir, el número de pares de mediciones (aire-líquido) a considerar; en la toma de datos se pide al osciloscopio el valor de voltaje pico a pico de la señal con la que se esta realizando las mediciones; los datos son guardados (en un archivo de Excel) después de que se tienen completo cada par de medición aire-liquido.

3.6. Calibración y caracterización en el aire

La instalación experimental debe ser armada con cuidado para asemejar lo más posible el modelo a gran escala al modelo teórico del sensor refractométrico. Armado y fijado el sistema experimental, se deben de realizar mediciones de calibración que ayudarán principalmente a corroborar si las posiciones de los dispositivos son las deseadas. Para ello, se realiza un barrido de las posiciones de las fibras ópticas y se obtiene la respuesta que da el sensor cuando el medio externo es el aire. Los resultados se comparan con los obtenidos teóricamente con las simulaciones [1], siendo de interés la forma de la curva, pues en ella se presentan picos en la transmisión óptica que corresponden a distancias relativas definidas de las fibras. Se espera que con un armado detallado el sistema, se obtengan resultados muy cercanos a los simulados.

No para todas las posiciones de las fibras se presenta condiciones de acoplamiento entre ellas, por lo que solo representa interés el rango donde exista transmisión óptica. Así, teóricamente comienza a presentarse alrededor de $\Lambda=0.69$ considerando aire como medio externo, y un barrido rápido de las distancias de las fibras confirma este hecho.

Mediciones

Se hacen cuatro barridos de las posiciones de las fibras a partir de $\Lambda=0.69$ solo para observar que se presenten los picos en posiciones relativas de las fibras cercanas a las predichas teóricamente. La Figura 3.15 muestra los resultados obtenidos, y la línea

continua muestra el promedio de las mediciones. Se observa que tiene un comportamiento donde presenta picos de transmisión que corresponden al acoplamiento de las fibras debido a las reflexiones totales internas que sufre el haz de luz; cuando la posición de las fibras ópticas se aproxima a la frontera del elemento óptico, se presenta mayor transmisión ya que la mayoría de los rayos de luz que inciden sobre la superficie del elemento semiesférico cumplen con la condición de reflexión total interna. También, se observa el efecto de la salida del núcleo de las fibras de la geometría del elemento óptico, lo que se refleja en la gráfica de la Figura 3.15 como una disminución en la transmisión a distancias relativas de las fibras cercanas a $\Lambda=1$.

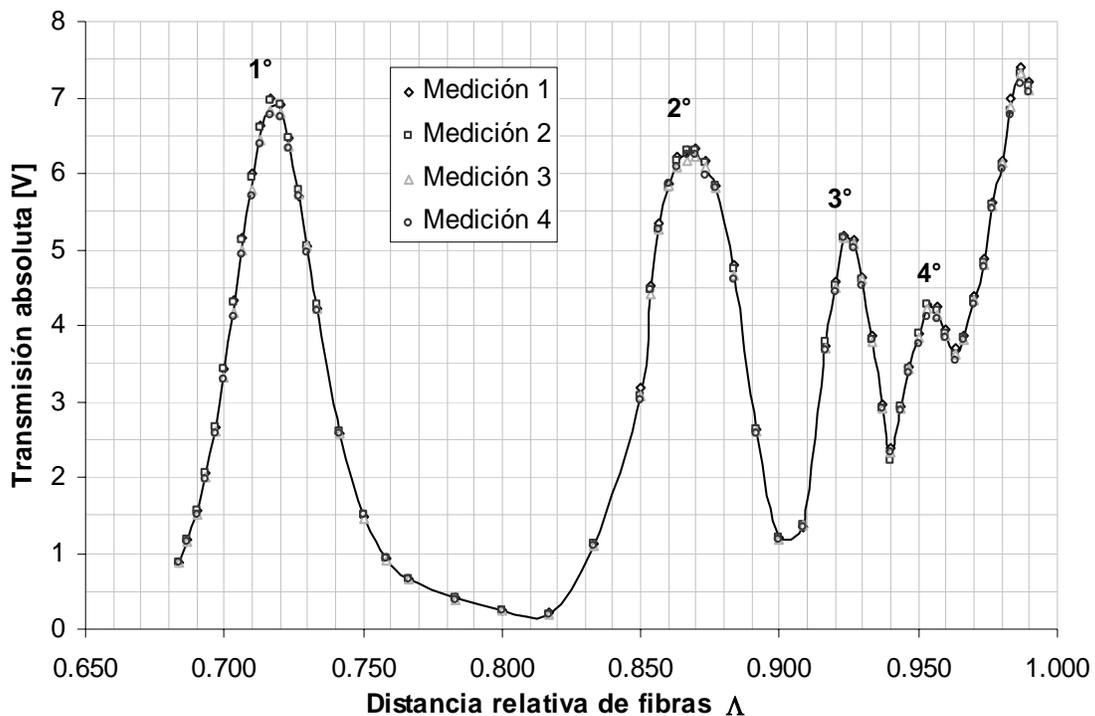


Figura 3.15. Transmisión absoluta del sensor en el aire contra la posición de las fibras ópticas Δ . La transmisión esta expresada en términos de voltaje de salida de foto receptor. La línea continua es el promedio las cuatro mediciones experimentales.

En la Tabla 3.6 se muestran las posiciones relativas de las fibras, del modelo teórico [1] y las obtenidas experimentalmente, donde se presentaron los picos de transmisión. Los valores obtenidos experimentalmente coinciden con las predicciones teóricas, presentando una discrepancia máxima del 1.27% en el 1^{er} pico de transmisión máxima ($\Lambda=0.707$). Este error se atribuye a las características reales de fibras y pequeños errores mecánicos del modelo a gran escala.

Número de pico de acoplamiento	Posición óptima teórica de las fibras ópticas	Posición óptima experimental de las fibras ópticas	Diferencia relativa respecto a la posición teórica
1 ^{er}	0.707	0.716	1.27%
2 ^o	0.866	0.870	0.46%
3 ^{er}	0.924	0.923	0.11%
4 ^o	0.951	0.953	0.21%

Tabla 3.6. Posición de las fibras ópticas Λ que resulta en el acoplamiento máximo de dos fibras ópticas en el sensor: comparación de predicciones teóricas y el experimento.

3.7. Conclusiones

La instalación descrita es resultado de una implementación en conjunto con el equipo de trabajo conformado para el estudio experimental del sensor. Es una instalación sencilla del modelo a gran escala del sensor, en donde se utiliza el equipo disponible en el laboratorio, y además permite modificar parámetros de interés, como la posición de las fibras y el medio externo, para investigar las características generales del sensor en forma experimental.

El uso de dispositivos digitales de medición, como el osciloscopio digital, permite la adquisición de datos por medio de la PC con ayuda de programas desarrollados para este fin, con lo que la información puede ser almacenada y procesada posteriormente.

El proceso de calibración es un paso importante una vez armada la instalación experimental, pues al ya tener la referencia teórica de puntos definidos para los picos en la transmisión, se verifica la correcta posición de las fibras ópticas. Los resultados obtenidos en el proceso de calibración prácticamente coinciden con los esperados teóricamente. Además, la instalación implementada puede servir como base para el estudio de otras características del sensor, pues es fácil de modificar para las necesidades de un determinado experimento, inclusive se pueden probar elementos ópticos con diferente geometría (parabólico, por ejemplo), incorporándoles un soporte de anillo similar al que tiene el elemento semiesférico actual.

4. Repetibilidad del sensor refractométrico

4.1. Introducción

En esta sección se busca determinar el origen y la magnitud relativa de las variaciones no deseadas que pueden presentarse en las mediciones realizadas por el sensor refractométrico, así como la determinación de la metodología experimental más adecuada a seguir considerando los factores de error en el sistema para su posible disminución.

Para todo dispositivo de medición se han definido una serie de parámetros para conocer las características en su funcionamiento, tales como:

- *Exactitud*, que indica que tan cerca está el valor medido por los instrumentos de medición del valor verdadero de la medición.
- *Precisión*, que es un grado de concordancia entre los datos de un grupo de mediciones e indica que tan esparcidos se encuentran.
- *Resolución*, que representa el mínimo incremento del parámetro bajo medición que puede ser identificado por el sistema y es determinado a partir de una curva de calibración del dispositivo.
- *Incertidumbre*, que representa el intervalo de valores en el que se afirma que dentro del mismo se encuentra el valor verdadero.

- *Sensitividad*, que es la relación del cambio en la respuesta del instrumento. Las curvas de calibración son usadas para determinar este parámetro, donde las zonas de mayor pendiente en la respuesta del sistema representan las zonas de mayor sensibilidad.

Una de las características que muestran la confiabilidad de los datos obtenidos por cualquier sistema de medición es el referente a la repetibilidad en la respuesta del mismo. El concepto de repetibilidad se refiere a la capacidad de un dispositivo de reproducir un experimento, bajo las mismas condiciones y en tiempos diferidos, y obtener una respuesta similar para cada una de las ocasiones en que este sea repetido.

La señal de salida de cualquier dispositivo de medición puede ser dividida en dos partes: una producida por la característica bajo medición (en nuestro caso el índice de refracción del medio externo al elemento óptico) y otra debida a elementos no deseados en la muestra y a factores que involucran a los dispositivos eléctricos, mecánicos y ópticos usados en la medición. Las aportaciones a la señal debidas a estas últimas características provocan errores y, por tanto, variaciones entre una y otra medición, afectando la repetibilidad del sistema.

4.1.1. Tipo de errores

Un error es la diferencia que existe entre el valor medido y el valor esperado, esto es, $E = (\text{medido}) - (\text{verdadero})$, donde E es el error de medición, *medido* es el valor obtenido de la medición y *verdadero* es el valor esperado de la medición.

Con el fin de que las mediciones obtenidas sean confiables, las fuentes de error deben de ser eliminadas o minimizadas. Los errores pueden ser clasificados como: sistemáticos (determinados) y aleatorios (indeterminados). El error total resulta de la contribución de estas dos clases. El error sistemático es determinado como un desplazamiento en las lecturas, mientras que el rango de variación de un grupo de datos es determinado por el error aleatorio.

Los *errores sistemáticos* resultan del proceso de la metodología experimental y cómo esta modifica las condiciones de trabajo del dispositivo, desviando los resultados esperados en una manera constante. Para que este error pueda ser minimizado es necesario conocer su origen y a partir de esto modificar el procedimiento en la experimentación. Entre algunas fuentes de este error está una calibración inapropiada de los instrumentos así como su manejo inadecuado, efectos del medio ambiente sobre los dispositivos del sensor y la muestra bajo experimentación, la modificación constante de la muestra a experimentar, imprecisión de los elementos mecánicos (desgaste de los instrumentos), intervención del humano en el proceso experimental y

de proceso de la información (mala lectura de los instrumentos por paralaje, ajuste incorrecto, errores de cómputo), etcétera. A continuación se explican brevemente algunas de las fuentes de errores sistemáticos:

- *Error de deriva*, que es producido por variaciones que se dan en las partes instrumentales en al modificarse su estructura química por variaciones ambientales como la temperatura, presión y humedad con la que operan los componentes. Es un fenómeno complejo que afecta a la sensibilidad y la exactitud del dispositivo y generalmente se refleja como un desplazamiento en la señal.
- *Ruido ambiental*, que involucra transferencias de energía del medio circundante al sistema de medición y ocurre típicamente a frecuencias determinadas o en relativamente anchos de banda pequeños; por ejemplo, los campos electromagnéticos producidos por las líneas de transmisión de 60Hz y sus respectivas armónicas, la energía radiante reflejada, vibraciones mecánicas y la interacción eléctrica entre los diferentes elementos que conforman al sistema. Puede ser reducido mediante el aislado electromagnético, aterrizaje apropiado de los instrumentos y el uso de frecuencias distintas al rango donde se presenta el ruido.
- *Histéresis mecánica*, que al tener un sistema mecánico con el que se varia la posición de alguno de sus elementos, pueden presentarse pequeñas diferencias en la posición dada por el sistema mecánico, con respecto a la real y a la ofrecida previamente si el movimiento es hecho en un sentido contrario. Es uno de los principales problemas en la instrumentación y el error provocado por este fenómeno dependerá de la precisión y calidad de los dispositivos instrumentales con que se están trabajando.
- *Movimiento de los elementos*, que son debidas a una mala fijación de las piezas que provocan movimientos no deseados en el dispositivo del cual forman parte durante el desarrollo experimental y se reflejan como errores en las mediciones.
- *Saturación*, ya que los elementos que proporcionan ganancia a la señal tienen un límite físico, cuando una señal excede dichos límites es distorsionada y la salida no presenta una respuesta lineal del sistema.

Por otra parte, se tienen también el *error aleatorio* que algunas veces es referido como ruido y está presente en cualquier toma de datos en algún dispositivo; su magnitud generalmente es pequeña sin que esta contenga información acerca de la medición. Este error aleatorio se atribuye a todos los fenómenos que afectan al

sistema pero presentan un carácter meramente aleatorio, por ejemplo, el ruido térmico o ruido de disparo en dispositivos semiconductores. Sus efectos pueden minorizarse incrementando el número de lecturas hechas y utilizando medios estadísticos para obtener la mejor aproximación al valor verdadero de la cantidad bajo medición. Si una medición que contenga este tipo de error es repetida un número n de veces, esta presentará una distribución gaussiana. La precisión de una medición es normalmente cuantificada por la desviación estándar que indica el ancho de dicha distribución; entre menor sea este valor, la medición será más precisa.

Es posible estimar, bajo algunas consideraciones, los límites del error esperado. El método más común para la estimación de estos errores considerando que las medidas presentan una distribución normal. Esto es:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu)^2/\sigma^2} \quad (4.1)$$

donde X representa el valor obtenido de la medición, μ el promedio de la población de la variable X y σ es la desviación estándar de la población, expresada como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}} \quad (4.2)$$

donde X_i representa la i -ésima medición y n el número de datos de la población.

Teóricamente la desviación estándar es definida para una población infinita. En la práctica, el número de datos es finito (N). La desviación estándar de las muestras, σ_x , definida como:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (4.3)$$

donde \bar{X} representa la media aritmética y representa el valor más probable de un conjunto de mediciones variables. Una desviación de $\pm\sigma$ se conoce como error estándar y con frecuencia se considera como un índice o medida de precisión.

4.1.2. Relación señal a ruido.

La capacidad de un instrumento de discriminar entre señales y ruido es usualmente expresada por la relación señal a ruido (S/N), donde:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{potencia de la señal}}{\text{potencia del ruido}} \quad (4.4)$$

El *límite de detección* es generalmente definido como el cambio del parámetro a medir que da una señal determinada significativamente diferente de la señal de ruido. Esta definición deja abierta la posibilidad de definir de acuerdo a la aplicación lo que es un cambio significativamente diferente.

Mediante un procesamiento simple de los datos se puede obtener una reducción de los efectos del ruido sobre la señal. Los programas realizados para las mediciones en este trabajo contienen un proceso con el que se busca mejorar la relación señal a ruido: *promedio de conjunto*, que puede ser aplicado para señales que cambian rápidamente en función del tiempo. Los resultados de n repeticiones de la medición de un mismo fenómeno son sumadas y divididas entre n para obtener un promedio de éstas. Si cada conjunto de mediciones es hecho siguiendo los mismos pasos, los datos que arrojan las mediciones deberán sumarse coherentemente (la respuesta del sistema debe ser repetitiva) y mientras el ruido aleatorio es disminuido, la señal es mejorada. Los datos obtenidos por este método representan una distribución estadística normal y la relación señal a ruido resultante será incrementada:

$$S/N = 2\sqrt{n}(S/N)_0 \quad (4.5)$$

donde $(S/N)_0$ es la relación señal a ruido de los datos que no han sido tratados y n el número de datos tomados para la obtención del valor promedio.

4.2. Pruebas de repetibilidad del sensor refractométrico

4.2.1. Consideraciones previas sobre el elemento óptico

Como se ha comentado, el elemento óptico está constituido por una semiesfera de paredes delgadas y cuyo volumen es completado con glicerina, por la similitud en sus índices de refracción. Se sabe que por las características propias de la glicerina, esta absorbe humedad del ambiente; propiedad que provoca cambios en su composición química y, por tanto, modificaciones en su índice de refracción. Sin embargo, para efectos de este trabajo se considera que dichos cambios no repercuten en un periodo de tiempo corto en que se realizan el conjunto de mediciones.

4. Repetibilidad del sensor refractométrico

En mediciones preliminares, se observaron discrepancia con las suposiciones teóricas para posiciones en que el núcleo de las fibras ópticas emisora y receptora no se encuentran en su totalidad dentro de los límites determinados por las caras internas de la semiesfera, como lo muestra la Figura 4.1, en donde se observa la transmitividad absoluta para dos medios externos al elemento óptico: aire y agua. Teóricamente, la señal medida en el aire tendría que ser siempre mayor que la medida para cualquier medio con un índice de refracción mayor, como lo es el agua. Esto se debe a las distintas condiciones de acoplamiento del haz de luz entre la fibra óptica emisora y receptora para estos medios, ya que la reflexión interna total en la superficie del elemento óptico en contacto con el medio externo se presenta a distintas posiciones. Una vez que para ambos medios se presenta dicha condición, las lecturas para ambos medios deberían de tender al mismo valor.

De los datos experimentales, se observa una zona en que las respuestas muestran un comportamiento errático (cruce de los valores de las lecturas tomadas). Dicha zona corresponde a las posiciones de las fibras ópticas en las que sus núcleos no se encuentran por completo dentro de la glicerina. Este comportamiento es atribuido a la diferencia en el índice de refracción de la glicerina con el del material de las paredes de la semiesfera. Por esta razón, se ha determinado que los datos experimentales para esta sección tendrán como límite la distancia de las fibras ópticas para la cual la mitad de los núcleos se encuentren dentro de la glicerina, correspondiendo a $\Lambda=0.935$ (28.05mm).

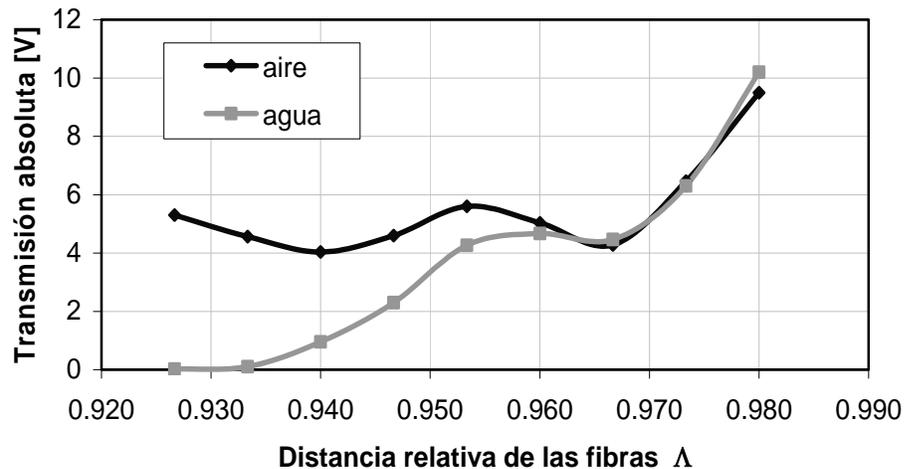


Figura 4.1. Respuesta del sensor para dos medios en la zona de transición en que los núcleos de las fibras ópticas dejan de estar por completo dentro de la glicerina.

4.2.1. Mediciones experimentales

A continuación se describen las mediciones realizadas para conocer la repetibilidad que puede ofrecer el modelo usado del sensor. Se realizan cuatro pruebas básicas. La *prueba 1* esta enfocada a observar posibles variaciones que puedan existir por efectos de medición con el osciloscopio digital, esto es, variaciones debidas a la escala usada en él, ya que con la instalación experimental implementada se pueden medir señales con niveles de voltaje tanto del orden de los milivolts como de los volts. En la *prueba 2* se pretende observar la existencia de cambios en la transmisión, teniendo como medio externo el aire, si el elemento óptico no es debidamente limpiado; se usa agua y una solución salina (cuyos residuos son fáciles de limpiar al enjuagar el elemento óptico) donde es sumergido el elemento óptico. Con la *prueba 3* se pretende observar posibles variaciones en la transmisión relativa por pequeños efectos mecánicos al desplazar las fibras, realizando el barrido de su posición con el aire y después con el agua como medios externos. En la *prueba 4*, de forma similar a la *prueba 3*, se obtiene la transferencia relativa en un rango de posiciones relativas de las fibras, sin embargo en este caso se realizan todas las mediciones aire-agua en una posición antes de cambiar a la siguiente. Para efectos de este trabajo, se utilizará la desviación estándar como índice de la variación de los resultados obtenidos.

Todos los datos son medidos con ayuda del osciloscopio y la PC via puerto serial. Además, para las pruebas realizadas (con excepción de la *prueba 1* donde se toma la lectura instantánea) cada medición es obtenida como resultado del promedio de diez lecturas tomadas en intervalos de un segundo.

Prueba 1

Se realizan dos mediciones de la intensidad óptica que da el sensor en un periodo de tiempo cuando el medio externo se mantiene constante, pero con diferente nivel de voltaje en la señal de la salida del circuito fotoreceptor. Las mediciones se efectúan para observar los posibles cambios que pueden existir por efectos de medición con el osciloscopio digital.

Se colocan las fibras en dos posiciones: $\Lambda=0.9033$ y $\Lambda=0.9233$, puntos donde el acoplamiento entre los haces es escaso y máximo, respectivamente. Se realizan las mediciones para cada posición en intervalos de 30 segundos durante 45 minutos, usando como medio externo agua. La Figura 4.2 muestra los resultados obtenidos para los posición $\Lambda=0.9033$, y la Figura 4.3 para la posición $\Lambda=0.9033$.

Para la posición $\Lambda=0.9033$, la transmisión promedio obtenida es de 57.40 [mV] y $\sigma=1.66$ [mV]. Los valores máximos y mínimos obtenidos son 60.66[mV] y 52.33 [mV], respectivamente.

4. Repetibilidad del sensor refractométrico

Para la posición $\Lambda=0.9233$, la transmisión promedio obtenida es de 5.59 [V], con $\sigma=23.66[\text{mV}]$. Los valores máximos y mínimos obtenidos son 5.633[mV] y 5.566 [mV], respectivamente.

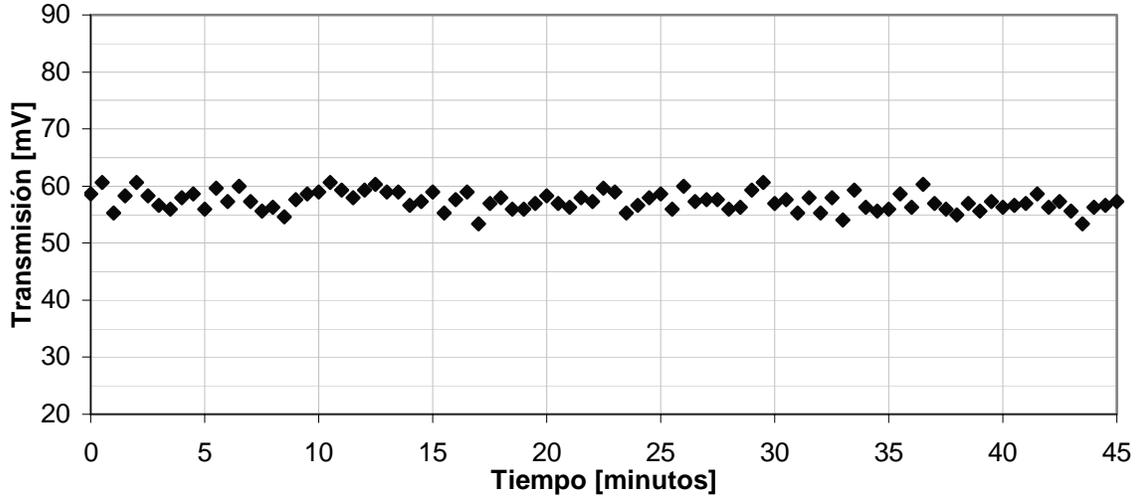


Figura 4.2. Comportamiento de la transmisión en el sensor para la posición $\Lambda=0.9033$ durante un periodo de 45 minutos.

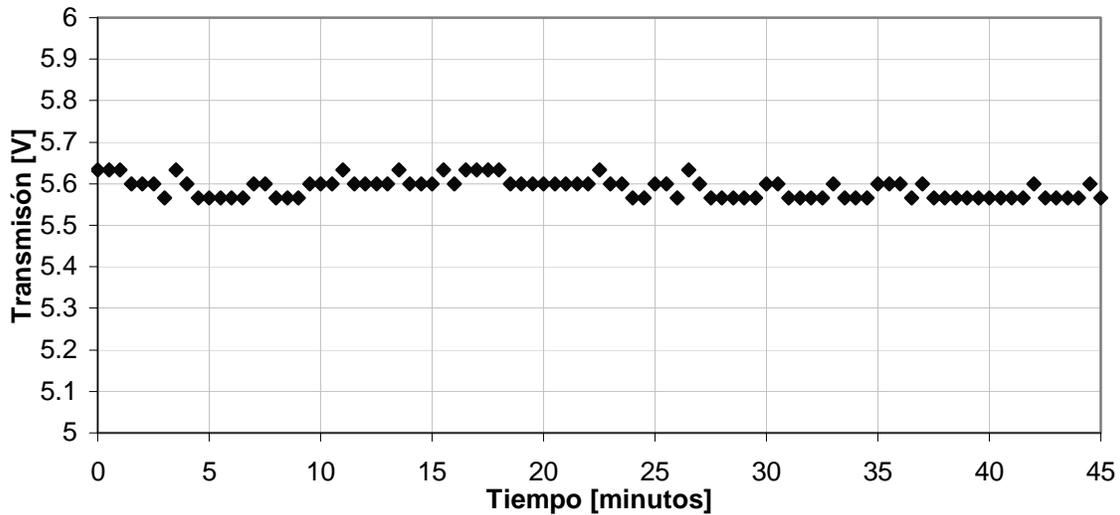


Figura 4.3. Comportamiento de la transmisión en el sensor para la posición $\Lambda=0.9233$ durante un periodo de 45 minutos.

Prueba 2

Se realizaron lecturas del sensor cuando el medio externo es el aire antes de sumergirlo a un líquido y después de ello secándolo solamente (sin realizar una limpieza meticulosa). Los líquidos usados como medios externos para este experimento fueron elegidos para tener dos diferentes muestras y que fueran fáciles

4. Repetibilidad del sensor refractométrico

de limpiar en el sensor para volver a las condiciones iniciales al realizar las rondas de medición; así, se usan agua y solución salina (64g de NaCl por litro). La posición relativa de las fibras usada fue $\Lambda=0.9233$.

Primeramente, se mide la transmisión del sensor en el aire, posteriormente se sumerge el sensor en el líquido por un pequeño lapso de tiempo, después el elemento óptico es secado solamente, y se realiza la medición en el aire nuevamente; se limpia el sensor nuevamente (se enjuaga con agua y se seca) para llegar a las condiciones iniciales con el fin de realizar la siguiente ronda de medición. Las Figura 4.4 y Figura 4.5 muestran los resultados obtenidos usando como líquido el agua y la solución salina, respectivamente.

Para el caso de usar como líquido el agua, la transmisión óptica se mantuvo prácticamente igual a la obtenida en al condición inicial; usando este líquido en la condición inicial se una transmisión promedio de 8.465 [V] con una desviación estándar de 26.9 [mV], y para la condición final se obtuvo una transmisión promedio de 8.448 [V] con una desviación estándar de 46.7 [mV].

La transmisión óptica al usar la solución salina tuvo variaciones respecto a la condición final; para este caso en la condición inicial se tiene una transmisión promedio de 8.458 [V] con una desviación estándar de 30.7 [mV], y para la condición final se obtuvo una transmisión promedio de 7.370 [V] con una desviación estándar de 192.8 [mV].

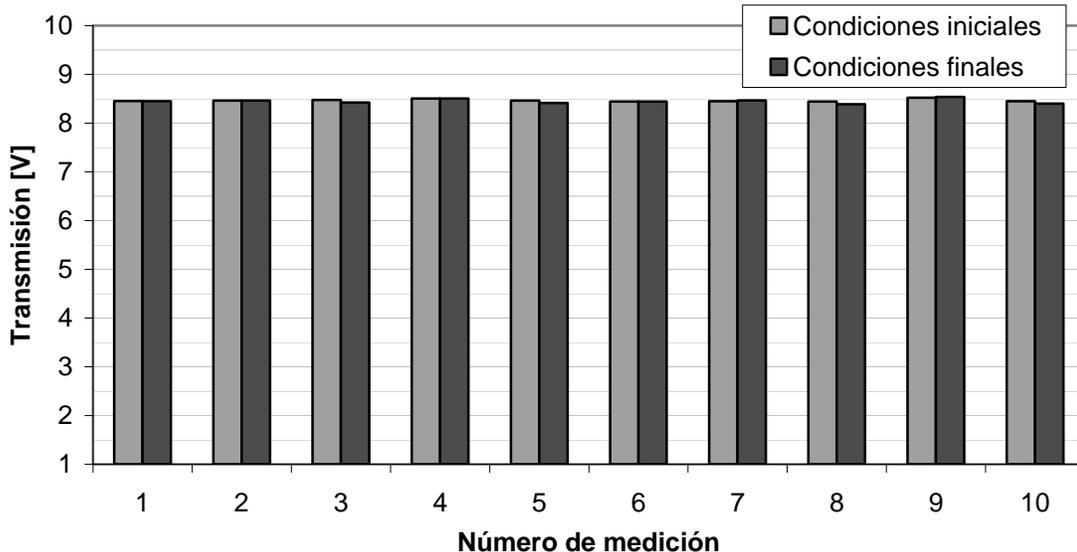


Figura 4.4. Mediciones del sensor teniendo como medio externo el aire. La primera barra corresponde a las condiciones iniciales del sensor, y la segunda a las condiciones del sensor después de sumergir en elemento óptico en agua y secarlo posteriormente.

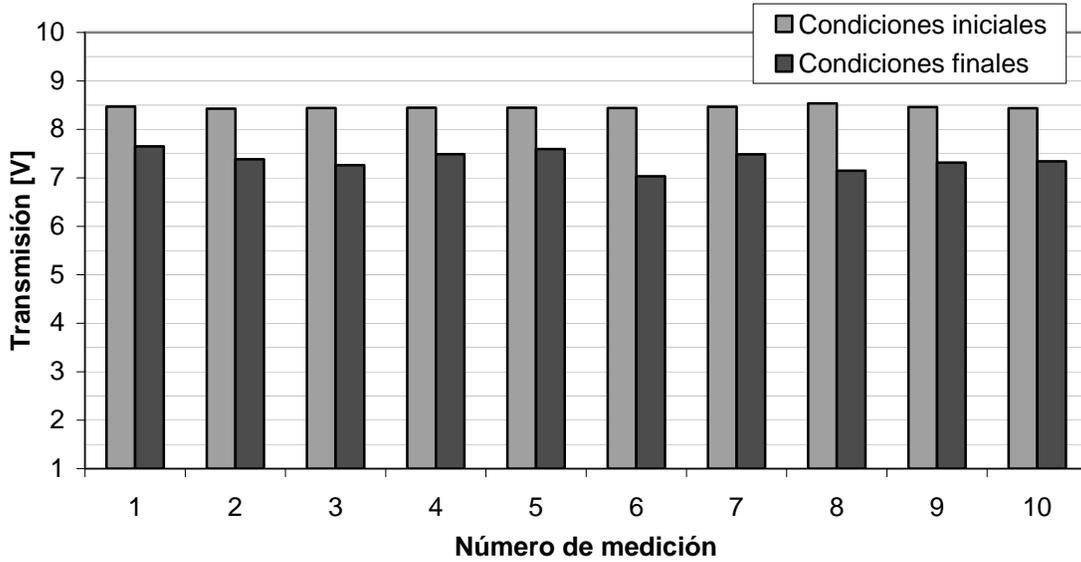


Figura 4.5. Mediciones del sensor teniendo como medio externo el aire. La primera barra corresponde a las condiciones iniciales del sensor, y la segunda a las condiciones del sensor después de sumergir el elemento óptico en una solución salina (64g de NaCl por litro) y secarlo posteriormente.

Prueba 3

En esta prueba se realiza un barrido en la distancia relativa de las fibras teniendo primero como medio externo el aire, y después un barrido nuevamente de la distancia de las fibras teniendo como medio externo agua, haciendo este procedimiento siete ocasiones; el elemento óptico es secado al iniciar la medición en el aire. La distancia relativa de las fibras se comienza a variar incrementándola desde el mismo punto ($\Lambda=0.9067$); la Figura 4.6 y la Tabla 4.1 muestran las mediciones obtenidas a partir de $\Lambda=0.9067$ ($L=27.2\text{mm}$) a cada $\Lambda=0.0033$ ($L=0.1\text{mm}$) hasta llegar a $\Lambda=0.9333$ ($L=28\text{mm}$).

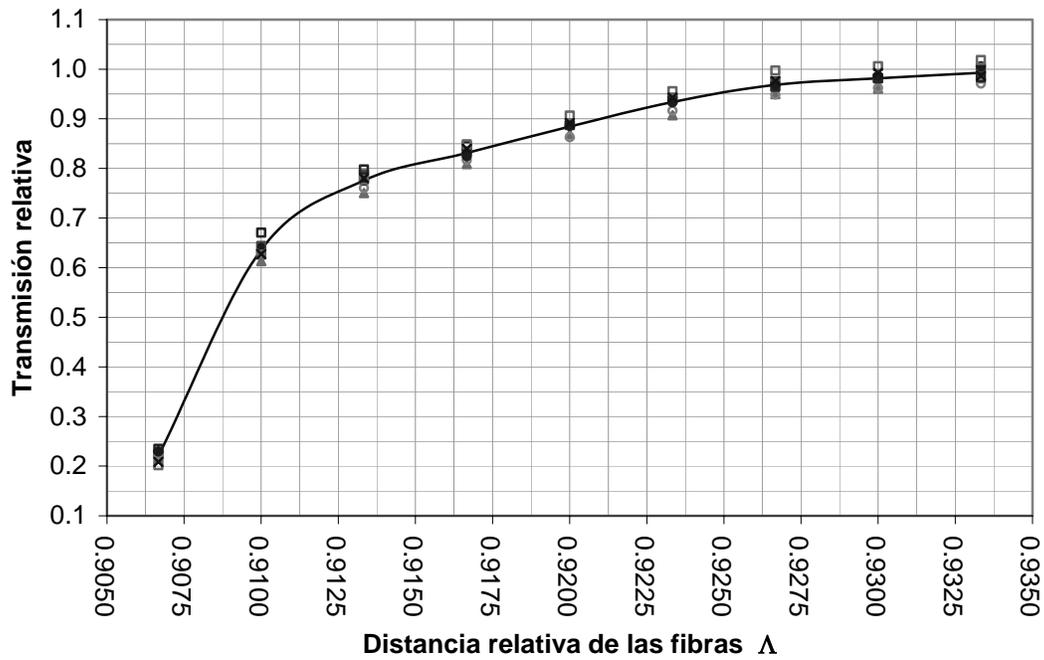


Figura 4.6. Curva de distancia relativa de las fibras contra transmisión relativa. Cada punto corresponde a una lectura tomada fijando el medio externo y variando la distancia relativa de las fibras. La línea continua corresponde al promedio de las lecturas.

Λ	Transmisión relativa promedio	Desviación estándar de las mediciones
0.9067	0.2201	0.0116
0.9100	0.6362	0.0183
0.9133	0.7756	0.0160
0.9167	0.8311	0.0149
0.9200	0.8844	0.0145
0.9233	0.9338	0.0168
0.9267	0.9686	0.0168
0.9300	0.9816	0.0162
0.9333	0.9930	0.0166

Tabla 4.1. Transmisión relativa promedio y desviación estándar de las mediciones realizadas en el rango de $\Lambda=0.9067$ a $\Lambda=0.9067$.

Prueba 4

Se realizan la medición de la transmisión en el rango de $\Lambda=0.9067$ a $\Lambda=0.9067$ teniendo como medio externo el aire y el agua para obtener la transmisión relativa. A comparación de la *prueba 3*, en este caso se realizan los siete pares de mediciones aire-agua en una posición de las fibras: se realiza la medición de la transmisión teniendo como medio externo el aire, después la del agua, y se limpia el sensor

4. Repetibilidad del sensor refractométrico

meticulosamente para realizar el siguiente par de lectura aire-agua; al finalizarlas, se cambia su posición a la siguiente distancia relativa, repitiendo esto hasta $\Lambda=0.9067$. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.7 y la Tabla 4.2, la línea continua es el promedio de las lecturas.

Λ	Transmisión relativa promedio	Desviación estándar de las mediciones
0.9067	0.2093	0.0040
0.9100	0.6418	0.0035
0.9133	0.7787	0.0025
0.9167	0.8305	0.0021
0.9200	0.8821	0.0040
0.9233	0.9343	0.0051
0.9267	0.9592	0.0033
0.9300	0.9734	0.0022
0.9333	0.9775	0.0040

Tabla 4.2. Transmisión relativa promedio y desviación estándar de las mediciones realizadas en el rango de $\Lambda=0.9067$ a $\Lambda=0.9067$.

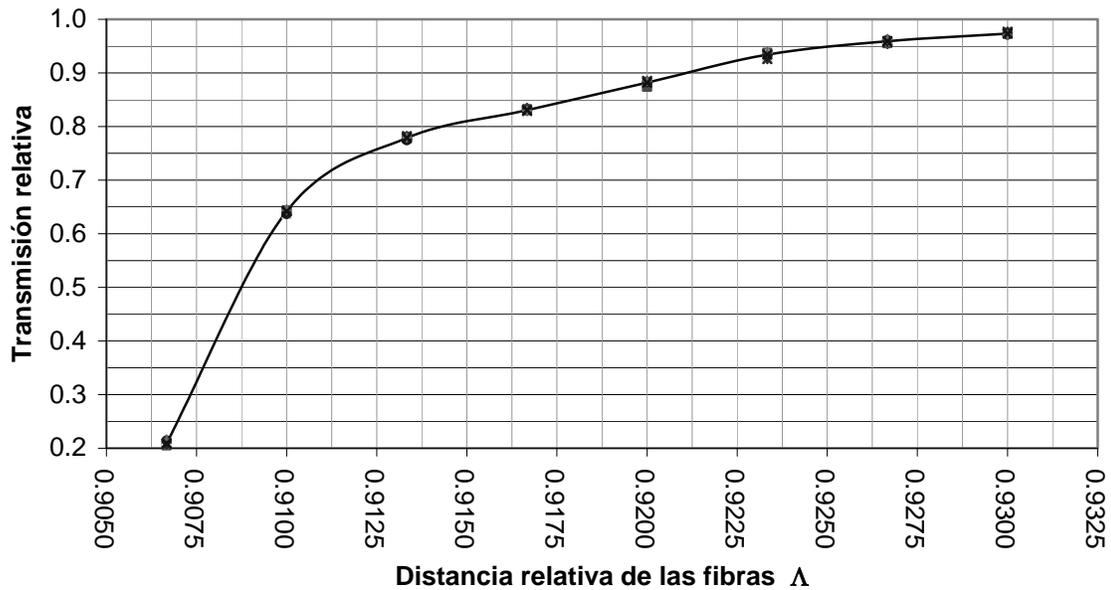


Figura 4.7. Curva de distancia relativa de las fibras contra transmisión relativa. Cada punto corresponde a una lectura en un tiempo diferente; la línea continua corresponde al promedio de las lecturas.

4.2.2. Discusión de resultados

De la *prueba 1* se observa que existen diferencias en las variaciones de los niveles de voltaje pico a pico que presenta la señal en cada caso, y que pueden ser atribuidas a la medición del osciloscopio digital con diferente escala. Para cuando la señal es del orden de los milivolts, la diferencia entre el valor máximo y el mínimo es menor que cuando se midió la señal del orden de los volts. Estos efectos son ajenos al funcionamiento propio del sensor, y considerando que son variaciones aleatorias, pueden ser minimizadas al usar una serie de lecturas tomadas a intervalos tiempo para con ellas obtener un promedio y éste asignarlo como el valor medido.

Para el correcto funcionamiento del sensor refractométrico es necesario que el elemento óptico semiesférico se encuentre limpio; los resultados en la *prueba 2* revelan que al usar sustancias que pudieran dejar algún residuo en la superficie del elemento óptico, afectan directamente a la transmisión, lo cual se refleja en la Figura 4.5, donde las variaciones presentadas se atribuyen a residuos de la solución salina; para el caso usando agua, se presenta una variación del 0.2% del promedio de la transmisión en la condición final con respecto al promedio de la transmisión inicial en el aire. Usando la solución salina, la variación del promedios de transmisión en el aire en la condición final con respecto a la condición inicial resultó de 12.8%. Así, se observa que las condiciones de limpieza de la superficie del elemento óptico afectan directamente la repetibilidad del sensor.

Los resultados de la *prueba 3* sugieren que existen pequeñas variaciones en el sistema mecánico de traslación de las fibras, lo que propicia a pequeños cambios en la transmisión. Considerando la desviación estándar de las muestras, se tiene una variación máxima en la transmisión relativa de 1.83% respecto al promedio. Por otro lado, los resultados en la *prueba 4* muestran menos variación respecto al promedio: la variación máxima en la transmisión relativa es de 0.51%. La diferencia entre las variaciones de las transmisiones relativas es atribuida a la diferente metodología para tomar las mediciones en cada caso; así, de ser necesario realizar mediciones de la respuesta del sensor en un intervalo de posiciones de las fibras, es recomendable realizar todas las mediciones de transmisión relativa en una posición, para posteriormente cambiar a la siguiente. La *prueba 4* es la más representativa en cuando a la repetibilidad del sensor refractométrico, pues para el funcionamiento del sensor en una aplicación real, la posición relativa de las fibras ópticas no variará, ya que las fibras estarán fijas al elemento semiesférico en una posición determinada.

4.2.3. Conclusiones

La repetibilidad del modelo a gran escala del sensor refractométrico usado en esta etapa experimental es afectada principalmente por errores sistemáticos realizados en el proceso de la metodología para la realización de mediciones. De dichos errores, destacan las variaciones mostradas por el osciloscopio digital al medir a diferente escalas (*Prueba 1*), pues no era esperado la existencia de tales.

La repetibilidad que presenta el sistema puede mejorarse si son tomadas las siguientes consideraciones:

- Debe de existir una limpieza rigurosa del elemento óptico previo a cada medición. La limpieza de la superficie del elemento óptico es un parámetro importante a considerar para conservar la repetibilidad en el sensor, ya que afecta directamente a la transmisión.
- Se debe de trabajar con valores promedio de cierto número de lecturas. Al realizar una medición sobre la transmisión del sensor, es conveniente que dicha medición provenga del promedio de una serie de lecturas tomadas a intervalos de tiempo, lo que conlleva a incrementar la relación señal a ruido de la señal medida, y así disminuir efectos de variaciones aleatorias.
- Mantener fijas las fibras en una posición al hacer mediciones para obtener la transmisión relativa con el fin de disminuir pequeños errores en el desplazamiento de las fibras.

Con estas consideraciones se puede esperar que la desviación estándar de las mediciones realizadas en esta instalación a gran escala sea a lo más del 0.5% respecto su promedio. Se considera que un factor que puede aumentar la repetibilidad del sensor es el uso de un dispositivo de medición que no presente los efectos de las variaciones del osciloscopio digital cuando se usan distintas escalas.

5. Conclusiones Generales

1. Para realizar estudios experimentales de sensores basados en fibra óptica donde se realicen variaciones en parámetros de su geometría, en una primera etapa de investigación, el uso de un modelo a gran escala resulta más práctico que trabajar sobre un prototipo a escala real, pues provee mayores facilidades en el control de parámetros que involucren variación de longitudes físicas o desplazamientos.

2. La instalación experimental propuesta, además de ser implementada con dispositivos simples, cumple con la función de brindar la posibilidad de realizar estudio experimentales generales de las características del sensor refractométrico, pues con resultados de la calibración se verificaron las zonas de transmisión respecto a las posiciones relativas de las fibras, con lo que se demuestra que los elementos que conforman la instalación se encuentran en la posición correcta. La estructura propuesta tiene la ventaja de ser genérica para el uso de elementos ópticos con diferente geometría o tamaño con respecto al elemento óptico semiesférico usado, pues bastaría con incorporar al nuevo elemento óptico un soporte anular similar al que posee el actual elemento óptico para incorporarlo a la estructura; además, proporciona la facilidad de ser modificada, funcionando como base para un arreglo experimental posterior. Por otra parte, con el conjunto de programas desarrollados para las mediciones en esta instalación, se tiene la facilidad de obtener y almacenar las mediciones directamente a la PC, incluso ya con un procesamiento básico para aumentar la relación S/R de la señal medida.

3. Sobre la repetibilidad usando dicha instalación experimental, se observa que es de importancia la metodología a seguir al realizar un conjunto de mediciones, de tal

forma que se puede obtener una desviación estándar máxima en las transmisiones relativas tal que corresponda a un 0.5% del valor promedio. La repetibilidad para una posición se ve afectada ligeramente por efectuar desplazamientos de las fibras durante las mediciones (como se muestra en la prueba 3 de la sección 4.2.1). Si bien es cierto que para estudiar la respuesta del sensor en distintas posiciones relativas de las fibras es inevitable realizar desplazamientos, se recomienda seguir la metodología usada en la Prueba 4 de la sección 4.2.1; sin embargo, cabe aclarar que dicho movimiento de desplazamiento hasta el momento no se prevé en una aplicación real del sensor, pues las fibras estarían unidas al elemento semiesférico.

La repetibilidad también se ve afectada por la limpieza de la superficie del elemento óptico. Los resultados obtenidos revelan que la transmisión sí es afectada al existir residuos sobre la superficie del elemento óptico que corresponden a una muestra tomada con anterioridad; ello también repercute a la transmisión relativa, que es, finalmente, la cantidad práctica utilizada los fines de medición del índice de refracción con éste sensor.

4. El mejoramiento de la instalación experimental en un trabajo posterior conllevaría a un aumento en la repetibilidad del sistema. Siendo una instalación que servirá en una primera etapa experimental, puede ser mejorada; sobresalen dos aspectos: la estructura del modelo del elemento óptico usada y el instrumento de medición de la señal entregada por el circuito fotoreceptor. El elemento óptico utilizado es una simulación de su estructura para una aplicación, pues en realidad no es una semiesfera totalmente sólida como la prevista en el sensor real, sino una estructura hueca rellena con glicerina (para intentar empatar los índices de refracción de las paredes de vidrio), por lo que, siendo estrictos, el comportamiento que presenta el modelo a gran escala es una aproximación del modelo real. Por otra parte, como se observó en las Prueba 1 de la sección 4.2.1, el osciloscopio digital presenta mayor variación, en milivolts, cuando se mide a escalas mayores que cuando las escalas de medición son pequeñas; por lo que, podría utilizarse en cambio un dispositivo de medición cuyas variaciones en la medición por efectos del cambio de escala de medición sean menores al osciloscopio digital utilizado en este trabajo.

5. Por los resultados teóricos y prácticos, el sensor refractométrico de elemento óptico semiesférico ofrece la ventaja poder de trabajar dentro de un rango relativamente amplio para las mediciones del índice de refracción. Con la variación de sus parámetros geométricos se puede modificar la respuesta del sensor de tal forma que se ajuste a un rango de índices de refracción de interés para alguna aplicación determinada. Esto lo convierte en un sensor refractométrico que puede ser usado *in-situ* y, por su tamaño en escala real, práctico para diversas aplicaciones relacionadas a la medición del índice de refracción de una sustancia como son la discriminación entre

un líquido u otro, discriminación entre líquido y aire, control de calidad de líquidos o la medición de un soluto en una solución acuosa (por ejemplo, medir la salinidad de una muestra). Sin embargo, para cualquier aplicación de éste sensor refractométrico, es necesario realizar un conjunto de pruebas previas para determinar los parámetros geométricos relativos que mejor le convengan.

APENDICES

APENDICE A: Código fuente de programas (Matlab)

Programa: INI_COM1

```
%Programa para inicializar el puerto COM1.
% Abreviaciones: OD ---> Osciloscopio Digital
%                PC ---> Personal computer

puerto=serial('COM1','BaudRate', 1200)
puerto.InputBufferSize=2048

fopen(puerto) % Se abre el puerto serial COM1 de la PC
fprintf(puerto, '*IDN?'); %Se manda un comando de peticion de identificacion al
                        % OD para verificar la conexion serial.
pause(0.2)
fscanf(puerto) % Se hace la lectura del puerto serial y se muestra en pantalla
fclose(puerto) % Se cierra el puerto.
```

Programa: PTP01

```
% Programa para capturar datos de la apertura angular.
% Se tiene un ajuste del filtro del OD a 20 MHz. Ademas, se tiene ajusta la
% pantalla del OD de 2ms/div (considerando que se trabaja con una señal
% de 100 Hz).
% Abreviatura: OD ----> Osciloscopio Digital

clear tabla;

bandera=1;
contador=0; % Variable auxiliar para modificar los indices de la matriz tabla.
medicion=2; % Variable que condiciona si el dato de la medicion se mantiene o
            %no.
guardar=0; % Variable que condiciona si las mediciones se guardan en un
            % archivo de Excel
tabla=[]; % Matriz en la que se guardan las mediciones.
datoN=[]; % Vector auxiliar para obtencion de promedios de mediciones

fprintf('\n \n ')

fprintf('\n INICIA PROGRAMA ----- \n \n \n')
guardar=menu('¿Desea guardar las mediciones en un archivo de Excel?','SI','NO');
% Con 'SI', guardar <--1. Con 'NO', Salir' , guardar <--2.

if guardar==1
    % Usando una ventana de dialogo:
    prompt ='Nombre del Archivo como se guardara: ';
    dlg_title = 'Guardar Archivo';
    num_lines = 1;
    respuesta = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines); % Se pide el nombre
                                                    % del archivo
    nomb_archivo=[respuesta{1,1},'.xls']; % donde se guardaran los datos.
end
fopen(puerto) % Se abre el puerto serial
% En numer_datos se guarda el numero de lecturas a tomar para realizar el
% promedio de esa medicion.
numer_datos=input(' INDIQUE EL NUMERO DE LECTURAS PARA EL PROMEDIO: ');
fprintf('\n \n ')
% En tiempo_datos se guarda el tiempo (en segundos) que hay entre cada una
% de las lecturas de numer_datos para una medicion dada.
```

```

tiempo_datos=input(' INDIQUE LOS SEGUNDOS ENTRE LA TOMA DE DATOS: ');
fprintf('\n \n ')
while bandera==1
    contador=contador+1;
    while medicion==2
        % Se pide al usuario ingresar el angulo a medir.
        tabla(contador,1)=input(' Angulo a medir [°]:');
        pause(0.2)
        % Instrucciones al osciloscopio por el puerto serial:
        fprintf(puerto,'CONF:PTP') % Se configura el osciloscopio para medir el
        pause(7) % voltaje pico-pico.
        fprintf(puerto,'SENS:OFFSET -2') % Ajuste de la señal AC para centrarla
        % verticalmente
        pause(0.2) % en la pantalla del osciloscopio.
        fprintf(puerto,'SENS:BLIM ON') % Se habilita el filtro a 20 MHz del
        % osciloscopio.
        pause(0.3)
        fprintf(puerto,'SENS:SWE 2E-2') % Se ajusta el osciloscopio a 2ms/div.
        pause(1)
        for ronda=1:numer_datos
            fprintf(puerto,'READ:PTP?'); % Se pide el valor del voltaje
            % pico-pico al osciloscopio
            pause(0.5)
            datoN(1,ronda)=str2num(fscanf(puerto)); %El dato es leído y guardado
            % en el vector datoN.
            if ronda~=numer_datos
                pause(tiempo_datos-0.5); % Se realiza la pausa determinada
                % por tiempo_datos
            end
            % entre lecturas.
        end
        end
        tabla(contador,2)=mean(datoN) % Se guarda en tabla el promedio de las
        % lecturas (datoN)
        medicion=menu(' ¿GUARDAR VALOR? ', ' SI ', ' NO ');
        % Con 'SI', medicion <--1 . Con 'NO', medicion <--2
    end
    medicion=2; % Se restablece el valor inicial de medicion
    if guardar==1 %Se guardan los nuevos valores
        archivo = fopen(nomb_archivo,'a');
        fprintf(archivo,'%f \t %f\n',tabla(contador,:)); % Se guarda el renglón
        % actual de tabla
        fclose(archivo);
    end
    bandera=menu('¿OTRA MEDICION?', 'SI', 'NO, SALIR');
    % Con 'SI', bandera <--1, Con 'NO', bandera <--2
end
fclose(puerto) % Se cierra el puerto serial
tabla=sortrows(tabla) %Se reacomoda la tabla el angulo menor al mayor

% ----- > Para hacer la grafica de la tabla -----

plot(tabla(:,1),tabla(:,2))
grid on;
% -----
fprintf('\n \n ')
fprintf('----- ')
fprintf('\n \n ')

```

Programa: PTP02

```

% Programa para capturar datos del sensor variando las distancias relativas.
% Se tiene un ajuste del filtro del OD a 20 MHz. Además, se tiene ajusta la
% pantalla del OD de 2ms/div (considerando que se trabaja con una señal
% de 100 Hz).
% Abreviatura: OD ----> Osciloscopio Digital

```

```
clear tabla;
```

```
bandera=1;
```

```

L_base=8; % Valor minimo del parametro L que puede obtenerse en
          % la instalacion experimental, en mm
contador=0; % Variable auxiliar para modificar los indices de la matriz tabla.
medicion=2; % Variable que condiciona si el dato de la medicion se mantiene o
          %no.
guardar=0; % Variable que condiciona si las mediciones se guardan en un
          % archivo de Excel
tabla=[]; % Matriz en la que se guardan las mediciones.
datoN=[]; % Vector auxiliar para obtencion de promedios de mediciones

fprintf('\n \n ')

fprintf('\n INICIA PROGRAMA ----- \n \n \n')
guardar=menu('¿Desea guardar las mediciones en un archivo de Excel?','SI','NO');
% Con 'SI', guardar <--1. Con 'NO', Salir' , guardar <--2.

if guardar==1
    % Usando una ventana de dialogo:
    prompt = 'Nombre del Archivo como se guardara: ';
    dlg_title = 'Guardar Archivo';
    num_lines = 1;
    respuesta = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines); % Se pide el nombre
          % del archivo
    nomb_archivo=[respuesta{1,1},'.xls']; % donde se guardaran los datos.
end
fopen(puerto) % Se abre el puerto serial
% En numer_datos se guarda el numero de lecturas a tomar para realizar el
% promedio de esa medicion.
numer_datos=input(' INDIQUE EL NUMERO DE LECTURAS PARA EL PROMEDIO: ');
fprintf('\n \n ')
% En tiempo_datos se guarda el tiempo (en segundos) que hay entre cada una
% de las lecturas de numer_datos para una medicion dada.
tiempo_datos=input(' INDIQUE LOS SEGUNDOS ENTRE LA TOMA DE DATOS: ');
fprintf('\n \n ')
while bandera==1
    contador=contador+1;
    while medicion==2
        % Se pide al usuario ingresar el desplazamiento medido en la
        % instalacion experimental. Se ajusta inmediatamente sumandole la
        % distancia base (L_base).
        tabla(contador,1)=input(' Desplazamiento [mm]:')+L_base;
        pause(0.2)
        % Instrucciones al osciloscopio por el puerto serial:
        fprintf(puerto,'CONF:PTP') % Se configura el osciloscopio para medir el
        pause(7) % voltaje pico-pico.
        fprintf(puerto,'SENS:OFFSET -2') % Ajuste de la señal AC para centrarla
          % verticalmente
        pause(0.2) % en la pantalla del osciloscopio.
        fprintf(puerto,'SENS:BLIM ON') % Se habilita el filtro a 20 MHz del
          % osciloscopio.
        pause(0.3)
        fprintf(puerto,'SENS:SWE 2E-2') % Se ajusta el osciloscopio a 2ms/div.
        pause(1)
        for ronda=1:numer_datos
            fprintf(puerto,'READ:PTP?'); % Se pide el valor del voltaje
          % pico-pico al osciloscopio
            pause(0.5)
            datoN(1,ronda)=str2num(fscanf(puerto)); %El dato es leído y guardado
          % en el vector datoN.
            if ronda~=numer_datos
                pause(tiempo_datos-0.5); % Se realiza la pausa determinada
          % por tiempo_datos
            end
          % entre lecturas.
        end
    end
    tabla(contador,2)=mean(datoN) % Se guarda en tabla el promedio de las
          % lecturas (datoN)
    medicion=menu(' ¿GUARDAR VALOR? ', ' SI ', ' NO ');
    % Con 'SI', medicion <--1 . Con 'NO', medicion <--2
end
medicion=2; % Se restablece el valor inicial de medicion
if guardar==1 %Se guardan los nuevos valores

```

```

        archivo = fopen(nomb_archivo,'a');
        fprintf(archivo,'%f \t %f\n',tabla(contador,:)); % Se guarda el renglón
                                                    % actual de tabla
        fclose(archivo);
    end
    bandera=menu('¿OTRA MEDICION?','SI','NO, SALIR');
% Con 'SI', bandera <--1, Con 'NO', bandera <--2
end
fclose(puerto) % Se cierra el puerto serial
tabla=sortrows(tabla) %Se reacomoda la tabla de distancia L menor al mayor

% ----- > Para hacer la grafica de la tabla -----

plot(tabla(:,1),tabla(:,2))
grid on;
% -----
fprintf('\n \n ')
fprintf('----- ')
fprintf('\n \n ')

```

Programa: PTP03

```

% Programa para capturar datos del sensor para una posicion fija
% variando el medio externo.
% Se tiene un ajuste del filtro del OD a 20 MHz. Ademas, se tiene ajusta la
% pantalla del OD de 2ms/div (considerando que se trabaja con una señal
% de 100 Hz). Se toman un determinado numero de lecturas en intervalos de tiempo
% para promediarlas y dar una medida final.

clear tabla;

bandera=1;
conta_tabla=1; % Variable que ayuda a modificar los indices de la matriz tabla.
mediccion=2; % Variable que condiciona si el dato de la medicion
                % se mantiene o no.
guardar=0;
tabla=[]; % Matriz en la que se guardan las mediciones.
datoN=[]; % Vector auxiliar

fprintf('\n \n ')

fprintf('\n INICIA PROGRAMA ----- \n \n \n')

guardar=menu('¿Desea guardar las mediciones en un archivo de Excel?','SI','NO');
% Con 'SI', guardar <--1. Con 'NO', guardar <--2.

if guardar==1
    % Se pide el nombre del archivo a guardar los datos.
    % Usando una ventana de dialogo:
    prompt ='Nombre del Archivo como se guardara: ';
    dlg_title = 'Guardar Archivo';
    num_lines = 1;
    respuesta = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines);
    % Nombre del archivo principal:
    nomb_archivo=[respuesta{1,1},'.xls'];
    nomb_archivo_prom=[respuesta{1,1},'_promedios'];
    % Nombre del archivo con los promedios para un liquido:
    nomb_archivo_prom=[nomb_archivo_prom,'.xls'];
end
fopen(puerto) % Se abre el puerto serial
numer_datos=input(' INDIQUE EL NUMERO DE LECTURAS PARA EL PROMEDIO: ');
fprintf('\n \n ')
% En numer_datos se guarda el numero de lecturas a tomar para realizar el
% promedio de esa medicion.
tiempo_datos=input(' INDIQUE LOS SEGUNDOS ENTRE LA TOMA DE DATOS: ');
fprintf('\n \n ')
% En tiempo_datos se guarda el tiempo (en segundos) que hay entre cada una
% de las lecturas de numer_datos para una medicion dada.
num_mediciones=input(' INDIQUE EL NUMERO DE MEDICIONES: ');

```

```

% En num_mediciones se guarda el numero de rondas aire-liquido a tomar para
% realizar un promedio.
fprintf('\n \n \n \n \n')
while bandera==1
    % Se pide al usuario ingresar el numero de liquido:
    num_liquido=input(' Numero de Liquido:');
    tabla_muestra=zeros(num_mediciones,3); % Se realiza una matriz de zeros
    tabla_muestra(:,1)=num_liquido;
    for contador=1:num_mediciones
        fluido=0;
        while (medicion==2) || (tabla_muestra(contador,2)==0)
            || (tabla_muestra(contador,3)==0)
                % Si medicion=2 o esta vacio algun renglon de la
                % tabla_muestra, se ingresa al while
                texto_menu_fluido= ['Indique el fluido a medir ',
                '(Liq:',num2str(num_liquido),' Ronda:',num2str(contador),'):'];
                switch fluido
                    case 0
                        texto_aire='AIRE';
                        texto_liq='LIQUIDO';
                    case 1
                        texto_aire='AIRE (presionado anteriormente)';
                        texto_liq='LIQUIDO';
                    case 2
                        texto_aire='AIRE';
                        texto_liq='LIQUIDO (presionado anteriormente)';
                end
                % Se despliega menu:
                fluido=menu(texto_menu_fluido,texto_aire,texto_liq);
                % Se hace un respaldo del renglon actual de tabla muestra:
                renglon_respaldo=tabla_muestra(contador,:);

                % Instrucciones al osciloscopio por el puerto serial:-----
                pause(0.2)
                % Se configura el osciloscopio para medir el voltaje pico-pico
                fprintf(puerto,'CONF:PTP')
                pause(7)
                % Ajuste de la señal AC para centrarla verticalmente
                fprintf(puerto,'SENS:OFFSET -2')
                pause(0.2)
                % Se habilita el filtro a 20 MHz del OD
                fprintf(puerto,'SENS:BLIM ON') .
                pause(0.3)
                % Se ajusta el osciloscopio a 2ms/div.
                fprintf(puerto,'SENS:SWE 2E-2')
                pause(1)
                for ronda=1:numero_datos
                    % Se pide el valor del voltaje pico-pico
                    fprintf(puerto,'READ:PTP?');
                    pause(0.5)
                    % Se lee y se guarda en el vector datoN.
                    datoN(1,ronda)=str2num(fscanf(puerto));
                    if ronda~=numero_datos
                        % Se realiza la pausa determinada por tiempo_datos entre lecturas
                        pause(tiempo_datos-0.5);
                    end
                end

                end
                if fluido==1 % Aire
                    tabla_muestra(contador,2)=mean(datoN)
                else % liquido
                    tabla_muestra(contador,3)=mean(datoN)
                end
                medicion=menu('%GUARDAR VALOR?','SI','NO');
                % Con 'SI', medicion <--1 . Con 'NO', medicion <--2
                if medicion==1 % Se guarda en tabla el valor de obtenido
                    tabla(conta_tabla,1)=num_liquido;
                    if fluido==1
                        tabla(conta_tabla,2)=mean(datoN)
                    else
                        tabla(conta_tabla,3)=mean(datoN)
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        else % Se reescribe en tabla_muestra el renglon de respaldo
            tabla_muestra(contador,:)=renglon_respaldo;
        end
    end
    % se restablece el valor de medicion=2 para que vuelva a entrar al while
    medicion=2;
    if guardar==1
        %Se guarda el nuevo renglon de la tabla en el archivo de Excel
        archivo = fopen(nomb_archivo,'a');
        fprintf(archivo,'%f \t %f \t %f\n',tabla(conta_tabla,:));
        fclose(archivo);
        conta_tabla=conta_tabla+1;
    end
end
%Se guarda el promedio de las lecturas para guardarlas en otro archivo;
proms_tabla=mean(tabla_muestra);
% Se hace la razon liquido_prom/aire_prom
proms_tabla(1,4)=proms_tabla(1,3)/proms_tabla(1,2);
% Los datos se guardan en el archivo de Excel
archivo = fopen(nomb_archivo_prom,'a');
fprintf(archivo,'%f \t %f \t %f \t %f\n',proms_tabla);
fclose(archivo);
medicion=2; % Se restablece el valor inicial de medicion
bandera=menu('¿OTRO LIQUIDO A MEDIR?','SI','NO, SALIR');
% Con 'SI', bandera <--1, con 'NO', bandera <--2
end
fclose(puerto) % Se cierra el puerto serial
fprintf('\n \n ')
fprintf('----- ')
fprintf('\n \n ')

```

APENDICE B: Artículo publicado relacionado con el sensor refractométrico.

62

Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники», ч.2, 2006

Биомедицинские приборы и системы

УДК 621.375

S. Khotiaintsev, PhD, C. E. García-Guerra, J. E. Morales-Farah, L. E. Yam-Ontiveros.

Measurement of water salinity using optical fiber refractometric transducer

Представлены экспериментальные результаты по измерению солёности воды с помощью рефрактометрического волоконно-оптического датчика. В датчике использован оптический чувствительный элемент в форме полусферы, в котором используется взаимосвязь между солёностью воды и ее показателем преломления. В настоящей работе описан принцип действия датчика, конструкция экспериментальной установки, и результаты измерения солёности воды с помощью описанного датчика. Показано, что датчик может измерять солёность воды в пределах от 0 до 300 промилле с погрешностью около 1%.

We present experimental data on water salinity measurement using an optical fiber refractometric transducer which incorporates hemispherical optical detection element. The transducer takes advantage of the relationship between the salinity of water and its refractive index. In this paper we describe the transducer operational principle and the experimental setup. We also include the results of the water salinity measurements made with this transducer. We demonstrate that this transducer can measure water salinity in the range of 0...300 ppt with an accuracy of approximately 1%.

Introduction

Water quality is important for living beings as well as for agriculture and many industrial processes. One of important characteristics of water is its salinity. Salinity is defined as the mass of dissolved salts in a given mass of water [1]. Also, the salinity can be defined as the dissolved salt content of a body of water and expressed as percent, parts per thousand (ppt or ‰), or parts per million (ppm) [2].

Different technologies and methods have been developed in recent years in order to replace old evaporation and hydrometric methods for the measurement of water salinity. Evaporation involves complex systems for controlling drying temperatures so that the salt remains in the sample container when the water evaporates. Hydrometric methods are based on the Archimedes principle. Despite their high accuracy, both mentioned methods are impractical for routine and in-field work. This situation leads researchers to find more practical methods for the measurement of water salinity *in situ*.

There are techniques that involve some physical properties of water related to its salinity. The most widespread of these methods consists in accessing the salinity of water by its conductivity. However, conductivity meters measure in fact the concentration of charged particles in water samples. Novel technologies make use of other physical quantities. In particular, optical and optoelectronic methods have been proposed for the measurement of water salinity. Optical-fiber sensors have acquired importance in this application due to their inherent advantages such as immunity to the electromagnetic interference, small size and weight of elements, the capability of remote use, the capacity to with-

stand severe environmental conditions, high sensitivity to certain physical quantities, and relatively low cost [3]. An optical beam deviation due to refractive index change of the salt water has been exploited in an optical fiber sensor described in [4]. The surface plasmon resonance has been employed in the refractometric sensor used for the measurement of water salinity described in [5].

In this work, we present an optical fiber transducer of the refractometric type which we employed for the measurement of water salinity. In the following sections, we explain the physical principle of the transducer, the experimental setup, and the experimental results which show the effect of different water salinity on transducer's optical transmission under various geometrical and optical parameters of the transducer.

Operational principle

The optical-fiber refractometric transducer consists of the following principal elements (Fig. 1.a). The light source excites the input optical fiber. The optical detection element of the hemispherical form couples optically the input and output optical fibers. The coupling efficiency depends on the internal reflection of light at the element's surface, which in turn depends on the refractive index of the surrounding medium. The light intensity at the output fiber exit is measured employing the semiconductor photo detector and the transimpedance signal amplifier.

The optical detection element is shown in Fig. 1. b. We employ the dimensionless quantities to describe the element's geometry. We relate all geometrical parameters of the transducer to the optical detection element's radius R . Two optical fibers of the dimensionless core diameter $\Phi = D/R$ are attached to the plain side of the detection element at the right angle to it. Both optical fibers are placed symmetrically with respect to the detection element axis at a dimensionless distance from the axis $\Lambda = L/R$.

When the optical fibers are at a distance Λ which provides for the adequate coupling, the light fed by the input optical fiber propagates through the detection element. When the light reaches the element's boundary, partial or total internal reflection of some rays occurs at the glass-liquid interface. The reflection coefficient is a function of the refractive index of the element material and the surrounding medium (salt water). A part of the incident beam is coupled to the output optical fiber by two or more serial internal reflections at the glass-liquid interface. Therefore, the element's transmission is a function of the refractive index of the surrounding medium, while the refractive index of the glass is a parameter.

The element's transmission is defined as the ratio of the output light intensity to the input one. However, the input light intensity is difficult to know in an optical fiber system. This is due to an uncertainty in the optical losses and coupling efficiency of different elements of the transducer. Therefore, it is necessary to exclude the incident light intensity from the measurement results.

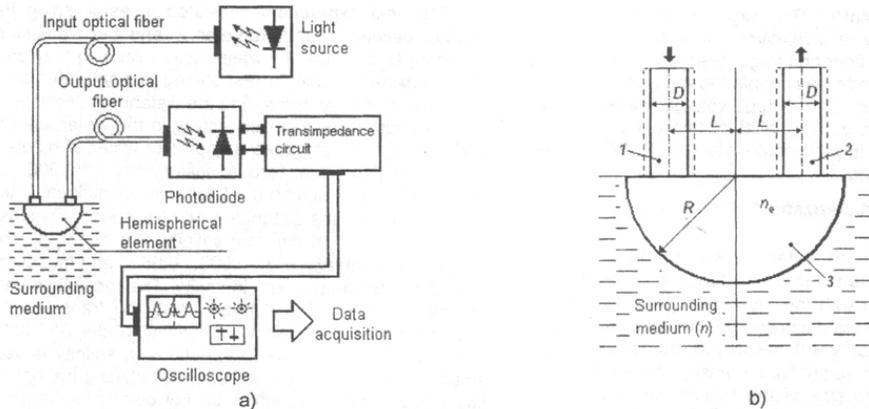


Fig 1. Schematic diagram of the optical fiber refractometric transducer (a) and the 2D view of the optical detection element (b): (1) – input optical fiber, (2) – output optical fiber, (3) – hemispherical optical detection element (glass).

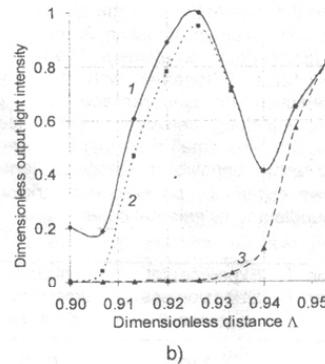
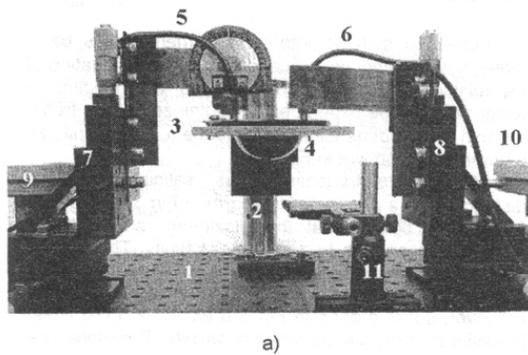


Fig 2. (a) – General view of the experimental setup: (1) – optical breadboard, (2) – post, (3) – platform, (4) – hemispherical optical element, (5), (6) – optical fiber, (sample support); (b) – Output light relative intensity relative to maximum vs. the optical fiber position Δ for different surrounding media: (1) – the air, (2) – distilled water, and (3) – saturated NaCl solution in water

According to [6], this can be done by using a relative transmission function of the transducer defined as:

$$T^* = \frac{I_2(n)}{I_{2air}} \quad (1)$$

I_{2air} is the output light intensity when the surrounding medium is air, and $I_2(n)$ is the output light intensity when the detection element is immersed in the measured liquid of the (unknown) refractive index n .

Experimental setup

In this work we used a physical model of the transducer of a relatively large size in order to secure high precision in the mechanical positioning of various elements, in particular, optical fibers with respect to the detection element. The general view of the experimental setup is shown in Fig. 2 a. All essential elements of the setup were assembled on the optical breadboard (1) (ThorLabs PBI51505).

The light source was a high radiance GaAlAs infrared light emitting diode (LED) (Everlight IR333C/H0/L10). This LED features an emission peak wavelength of 940 nm, spectral bandwidth of 45 nm and an angular beam full width of 40°. This LED was electrically driven by a triangular current wave of amplitude of 13.3 mA at 100Hz. The electrical current waveform source

was a waveform generator (Stanford Research Systems DS345).

The optical fibers (5) and (6) were indeed the optical fiber bundles composed of a large number of thin step index optical fibers. The linear aperture of each fiber bundle was of 1.3mm ($\Phi=0.043$) and an angular aperture was of 40°.

The termination of each optical fiber bundle (5) and (6) was attached to an XYZ translation stage (ThorLabs PT3) which secured precision positioning of each optical fiber bundle endface with respect to the optical detection element (4).

The optical detection element (4) was a hollow hemisphere made of 1mm thick glass ($n=1.472$ at $\lambda=633\text{nm}$). The external radius of the hemisphere was of 30mm. The glass hemisphere was filled with glycerin ($n=1.469$ at $\lambda=633\text{nm}$) so that there was a close index matching of the glass used for the hemisphere and its fill. The detection element was placed in the circular opening of the platform (3) which in turn was attached to the support (2). The optical fiber endfaces were in contact with the glycerin which filled the detection element. We immersed the detection element in water of different salinity.

The far end of the output optical fiber was coupled to a Germanium photodiode having a relatively large sensi-

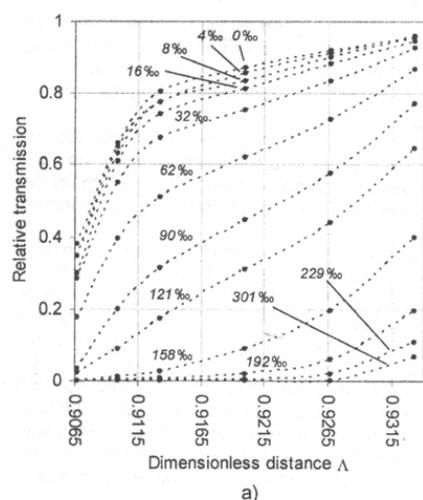
tive area (25.3mm²). The large sensitive area was employed in view of a relatively large core diameter of the output optical fiber and large divergence of the output light. The photodiode was coupled to the transimpedance electrical amplifier. The output voltage waveform was analyzed employing the digital oscilloscope. The data were also stored in a computer via the RS232 interface and then processed.

Transducer characterization

With the aim to establish the transmission characteristic of the transducer as a function of the distance Λ and compare it with the theoretical predictions of our previous work [6] we displaced the two optical fibers (5) and (6) symmetrically with respect to the transducer axis and accessed the output light intensity of the transducer. Because the finite size of the optical fibers imposes a limitation on placing the optical fibers close to the element's axis and at its edge, we varied the distance Λ in an interval of $\Lambda=0.69...0.99$. We determined the distance Λ resulting in a local maximum in absolute transmission when the element was in the air. These peaks correspond to the maximum coupling of the two optical fibers via the optical detection element. The relating data are given in Table 1 together with the respective theoretical predictions [6]. One can see that in general there is good matching between the predicted and observed behavior. The small discrepancy between the observed and factual behavior at smaller dimensionless distances Λ we explain by possible eccentricity of the optical fiber bundle and its external cover.

Table 1.

Transmission peak number	Experimental dimensionless distance Λ	Theoretical dimensionless distance Λ
1 ^{er}	0.716	0.707
2 ^o	0.870	0.866
3 ^{er}	0.923	0.924
4 ^o	0.953	0.951



The next experiment consisted in establishing the relation between the parameter Λ and the transducer capability to measure the water salinity ranging from zero to the maximum value corresponding to a saturated solution. That is, we wanted to find the distance Λ resulting in the maximum transducer sensitivity to the water salinity. With this aim we prepared samples of water of different salinity ranging from zero (distilled water) to 300 ppt (saturated NaCl solution). Then we investigated the relation between the distance Λ and transducer response to water samples of different salinity. We swept the distance Λ in an interval of $\Lambda=0.900...0.9533$ and measured the transducer output light intensity. The respective data are shown in Fig 2 b (Under $\Lambda<0.9$ the transducer is insensitive to the variations in salinity. Under $\Lambda>0.9533$ the transducer response to variations in salinity is very small. Therefore, there is no sense in placing the optical fibers at the distances which do not belong to the mentioned interval).

Following is the description of the salinity measurements performed under $0.9067<\Lambda<0.9333$.

Measurement of water salinity

Once the suitable interval of dimensionless parameter Λ was found, we proceeded to the investigation of the relative transmission characteristic as a function of water salinity. The experimentally obtained relative transmission vs. the dimensionless distance Λ , with salinity as a parameter is shown in Fig.3.a.

The relative transmission vs. salinity under the distance Λ as a parameter is shown in Fig 3 b. It follows from these figures that the maximum relative transmission corresponds to zero water salinity. The relative transmission decreases with increase in salinity. The transducer response to salinity is nonlinear in general. However, some graphs in Fig 3 b exhibit a quasi linear behavior in some limited range of salinity. Therefore, one can choose a parameter Λ which results in increased linearity of the transducer response to salinity in a particular salinity range. Furthermore, the transducer response to salinity can be approximated by a polynomial function and in this form used for salinity measurement if a large input range of this quantity is necessary in the transducer.

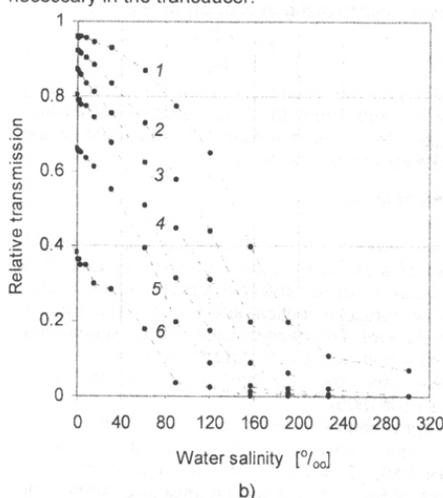


Fig. 3. Transducer relative transmission vs. the dimensionless optical fiber position Λ (a) and vs. the water salinity (b). (1) – $\Lambda=0.9333$, (2) – $\Lambda=0.9267$, (3) – $\Lambda=0.9200$, (4) – $\Lambda=0.9133$, (5) – $\Lambda=0.9100$, (6) – $\Lambda=0.9067$

Discussion

The transducer response to salinity depends strongly on the optical fiber dimensionless position Λ with respect to the optical detection element axis. In order to measure the water salinity in all physically possible range from 0 to 300 ppt the parameter Λ has to be within an interval of $\Lambda=0.93\dots 94$ approximately. For small water salinity the optimum dimensionless distance $\Lambda=0.92$, while for the discrimination between the air and pure water the optimum interval of Λ is of $\Lambda=0.9\dots 0.905$.

The transducer response to salinity is nonlinear in general. However, under $\Lambda=0.92$ the transducer exhibits a quasi-linear response in the salinity range of 0...160 ppt (for larger salinity the response is nonlinear). Thus, the linearity of transducer's response can be increased in a particular salinity range by proper selection of the parameter Λ . On the other hand, the nonlinear response of the transducer can be approximated by a polynomial function if its operation in a large salinity range is required.

Conclusions

The results obtained in this work demonstrate the feasibility of employing the optical-fiber refractometric transducer with hemispherical optical detection element for the salinity measurement. We successfully measured the water salinity in a range 0...300 ppt, the upper limit corresponded to the saturated NaCl solution. The measurement accuracy varies from 0.3% to 1% approximately depending on the particular salinity range and the choice of transducer parameters. The transducer is relatively simple, potentially small-size, chemically resistant, immune to electromagnetic interference, electrically

safe, and features many other advantages inherent to optical fiber components and elements.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support of the Faculty of Engineering and the General Directorate of the Academic Personnel (DGAPA) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM). C. E. G. G., J. E. M. F., and L. E. Y. O. acknowledge the scholarship provided by the UNAM-DGAPA through the research grant PAPIIT IN100502.

References

1. Lieb E. et al. *Chemistry of Marine Waters and Sediments*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002. 487p.
2. UNESCO. *The International System of Units (SI) en Oceanography*. Tech. Pap. Mar. Sci., 1985, Vol. 45. 124 p.
3. Udd E. "An overview of fiber-optic sensors." *Rev. Sci. Instruments*, 1995, Vol. 66, No. 8, 4015–4029.
4. Zhao Y., Liao Y., Zhang B., Lai S. "Monitoring Technology of Salinity in Water With Optical Fiber Sensor." *J. of Lightwave Techn.*, 2003, Vol. 21, No. 5, 1334–1338.
5. Esteban O., Cruz M., González A., Bernabeu E. "Measurement of the degree of salinity of water with a fiber-optic sensor." *Applied Optics*, 1999, Vol. 36, No. 25, 5267–5271.
6. V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart. "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element". *Optical Engineering*, 2002, Vol. 41, No 4, 779–787.

Referencias

- [1] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P.Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element", *Optical Engineering*, vol. 41, no 4, pp. 779-786, April 2002.
- [2] F. Yu, S. Yin. *Fiber optic sensors*. Marcel Dekker, 2002, 498 p.
- [3] E. Udd. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Wiley, New York, 1991, 496 p.
- [4] *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, ed. John G. Webster, CRC Press, 1999, 2608 p.
- [5] F. Graham, T. King. *Optics and photonics: An introduction*. Wiley, 2002, 446 p.
- [6] K. Lizuka. *Elements of photonics for fiber and integrated optics. Volume III*. Wiley-Interscience, 2002, 1197 p.
- [7] G. Agrawal. *Fiber-Optic Communications Systems*. Third edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002, 561 p.
- [8] E. Hecht. *Óptica*. 3ra edición, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000, 722 p.
- [9] J. Nérou. *Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas*. Trillas, 2001, 345p.
- [10] J. Graeme. *Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions*. McGraw-Hill, 1996, 276 p.
- [11] T.Takeo and H. Hatorri, "Silica glass fiber photorefractometric", *Applied Optics*, vol. 31 , no.1, pp. 44-50, January 1992.
- [12] R. Bernini, S. Campopiano, and L. Zeni, "Desing and analysis of and integrated antiresonant reflecting optical waveguide refractive-index sensor", *Applied Optics*, vol. 41 , no.1, pp. 70-73, January 2002.
- [13] G. J. Veldhuis, L. E. W. van der Veen, and P. V. Lambeck, "Integrated Optical Refractometer Based on Waveguide Bend Loss", *Journal of lightwave technology*, May 1999, vol. 17, no.5, pp. 857-864.

- [14] J. Zubia, G. Garitaonaindía, and J. Arrúe, "Passive device based on plastic optical fibers to determine the indices of refraction of liquids", *Applied Optics*, February 2000, vol.39 , no.6, pp. 941-946.
- [15] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P.Swart, "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element", *Optical Engineering*, Vol.42 No 5, pp 1383-1389, May 2002.
- [16] H. Willard, L. Merrit, J. Dean, and F. Settle. *Instrumental Methods of Analysis*. Seventh edition. Wadsworth Publishing Company. 1988, 895 p.
- [17] W. Cooper. *Instrumentación Electrónica y Mediciones*. Prentice Hall Hispanoamericana. 1982, 501 p.
- [18] Technical Data Sheet 5mm Infrared LED, T-1 3/4. Everlight Electronics Co. 2004. Product Catalog