



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFFECTOS DE LA ABSORCIÓN DEL MEDIO EN LA RESPUESTA DE UN SENSOR REFRACTOMÉTRICO EN FIBRAS ÓPTICAS

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Presenta

JORDI ELIAS MORALES FARAH

ASESOR: Dr. SERGEI KHOTIAINTSEV

Ciudad Universitaria, mayo 2006.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 Francisco, Arlette y Annette.

A Paquita, mi yaya, estás conmigo siempre.

Agradecimientos

A mi familia, por su amor, apoyo y estímulo que me han dado en todos los instantes de mi vida, y que sin ellos no hubiera alcanzado mis logros.

A mis amigos, por su sincera amistad y camaradería dentro y fuera de las aulas; por compartir tantos momentos conmigo.

A mis profesores de la carrera, que me permitieron satisfacer mi deseo de conocimiento e impulsaron mi desarrollo.

A mis amigos Kike y Yam, por haber colaborado conjuntamente en el proyecto que sustenta este trabajo con dedicación y esfuerzo, y con quienes compartí largas jornadas de trabajo experimental.

A mi director de tesis, el Dr. Sergei, por permitirme colaborar en este proyecto, por su apoyo y enseñanzas a lo largo del mismo.

A los doctores: Fatima Moumtadi, Victor García Garduño, Miguel Moctezuma Flores y Oleksandr Martynyuk, por acceder a ser mis sinodales y revisar mi trabajo de tesis.

Índice de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO	2
METAS.....	2
ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
CAPÍTULO 1 REFRACTOMETRÍA EN FIBRAS ÓPTICAS.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 REFRACTOMETRÍA	4
1.2.1 Métodos de refractometría	5
1.2.1.1 Método por Interferometría.....	5
1.2.1.2 Métodos de Desviación	6
1.2.1.3 Método del ángulo crítico	7
1.2.1.4 Método del ángulo de Brewster	7
1.2.1.5 Método por acoplamiento de índice de refracción	8
1.2.2 Aplicaciones de Refractometría.....	9
1.2.2.1 Salinidad	9
1.3 SENSORES EN FIBRAS ÓPTICAS	9
1.3.1 Conceptos básicos	10
1.3.2 Tipos de Sensores	10
1.3.3 Ventajas de los sensores en fibras ópticas.....	11
1.3.4 Estado del Arte de sensores refractométricos en fibras ópticas.....	12
1.4 SENSOR REFRACTOMÉTRICO EN FIBRAS ÓPTICAS CON ELEMENTO SEMIESFÉRICO.....	13
1.4.1 Principio de operación del sensor.....	13
1.4.2 Definición de parámetros	14
1.4.2.1 Parámetros físicos	14
1.4.2.2 Parámetros ópticos	15
1.4.3 Resultados Teóricos de estudios previos del sensor.....	16
1.5 CONCLUSIONES	19
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE SENSORES ÓPTICOS.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN ÓPTICA	20
2.3 ÍNDICE DE REFRACCIÓN.....	21
2.4 PROPAGACIÓN DE LA RADIACIÓN ÓPTICA	21
2.4.1 Ley de reflexión y refracción	21
2.4.2 Reflexión total interna	22
2.4.3 Reflectividad.....	23
2.5 FIBRAS ÓPTICAS	24
2.5.1 Fibras ópticas de perfil de índice escalonado	24
2.5.2 Fibras ópticas de perfil de índice graduado.....	26
2.6 FUENTES DE RADIACIÓN ÓPTICA	26
2.6.1 Procesos fundamentales de interacción entre luz y materia.....	27
2.6.2 Láser.....	27
2.6.3 Diodo emisor de luz (LED).....	29
2.7 FOTODETECTORES.....	30
2.7.1 Fotodiodo	30

2.7.2	<i>Fotodiodo p-i-n</i>	32
2.7.3	<i>Fotodiodo de avalancha APD</i>	32
2.8	EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS ÓPTICOS EN LA RESPUESTA DEL SENSOR	32
2.9	CONCLUSIONES	33
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....		34
3.1	INTRODUCCIÓN	34
3.2	SUBSISTEMA MECÁNICO.....	34
3.3	SUBSISTEMA ÓPTICO	36
3.3.1	<i>Fotodetector</i>	36
3.3.2	<i>Fuente de luz</i>	36
3.3.3	<i>Elemento semiesférico de detección</i>	37
3.3.4	<i>Fibras ópticas</i>	37
3.4	SUBSISTEMA ELÉCTRICO	39
3.4.1.1	Amplificador de transimpedancia de alta ganancia.....	40
3.4.1.2	Análisis en frecuencia para el circuito fotorreceptor.....	43
3.5	REPETIBILIDAD DE LA RESPUESTA DEL SENSOR.....	52
3.6	CALIBRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR EN EL AIRE.....	53
3.7	CONCLUSIONES	55
CAPÍTULO 4 EFECTOS DE LA ABSORCIÓN EN EL SENSOR REFRACTOMÉTRICO		56
4.1	INTRODUCCIÓN	56
4.2	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN E ÍNDICE DE REFRACCIÓN COMPLEJO	57
4.3	REFLEXIÓN EN UNA INTERFASE CON UN MEDIO ABSORBENTE	58
4.4	ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE ABSORCIÓN SOBRE LA RESPUESTA DEL SENSOR	59
4.4.1	<i>Efectos cualitativos en la transmisión por medios absorbentes.</i>	59
4.4.1.1	Elaboración de las muestras	59
4.4.1.2	Instalación experimental	60
4.4.1.3	Determinación de la absorción relativa	61
4.4.1.4	Medición de la transmisión	62
4.4.2	<i>Cuantificación de los efectos de la absorción en la transmisión</i>	63
4.4.2.1	Elaboración de las muestras	63
4.4.2.2	Determinación del coeficiente de absorción e índice de absorción	63
4.4.2.3	Transmisión del sensor.....	65
4.5	RESULTADOS DEL EXPERIMENTO	65
4.5.1	<i>Efectos cualitativos de la absorción en el sensor</i>	65
4.5.2	<i>Cuantificación de los efectos de la absorción en el sensor</i>	68
4.5.3	<i>Factor de corrección de la transmisión relativa</i>	70
4.6	CONCLUSIONES	71
CONCLUSIONES GENERALES.....		72
REFERENCIAS		74
APÉNDICE A. DATOS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....		76
	DIDO EMISOR DE LUZ EVERLIGHT MODELO IR333C/H0/L10	76
	AMPLIFICADOR OPERACIONAL LF356.....	77
APÉNDICE B. CÓDIGO FUENTE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....		78
	PROGRAMA PTP01	78
APÉNDICE C. ARTÍCULO PUBLICADO RELACIONADO CON EL SENSOR REFRACTOMÉTRICO		80

Introducción

Es bien sabido que el desarrollo de las fibras ópticas ha impactado a la industria de las telecomunicaciones de tal manera que hoy en día existen miles de kilómetros de cables ópticos tendidos con estos fines. Sin embargo, las posibilidades que ofrecen las fibras ópticas van más allá de la transmisión de datos. En las últimas dos décadas se han realizado investigaciones intensas en sensores basados en fibras ópticas, debido a su aplicación en un gran número de campos, las ventajas inherentes que presentan y la compatibilidad con los sistemas existentes de comunicaciones basados en fibras ópticas. Así, los sensores refractométricos en fibras ópticas forman parte de estos dispositivos con una perspectiva amplia. Apoyados en la medición de la propiedad óptica llamada índice de refracción de los medios, es posible su aplicación principalmente en fluidos, ya sea en procesos industriales, sistemas de control de calidad, determinación de concentraciones volumétricas de solutos o proporciones volumétricas de coloide en solventes, por mencionar algunos.

Las técnicas de refractometría clásica se basan principalmente en la medición del índice de refracción por el método del ángulo crítico. Esta técnica, junto con la técnica del método del ángulo de Brewster, ha sido analizada en casos en que la muestra a medir es un medio absorbente [22], arrojando resultados que demuestran la posibilidad de medir un índice de refracción erróneo causado por este efecto.

En el presente trabajo se investiga las características de una variante de sensor refractométrico único en su género ya que emplea un elemento óptico semiesférico [1]. Este transductor óptico de tipo extrínseco está formado por dos fibras ópticas que se acoplan ópticamente mediante un elemento semiesférico, y la reflexión interna total o parcial dentro del elemento semiesférico depende del índice de refracción del medio que circunda al elemento. Este sensor ha sido analizado teóricamente mediante simulaciones numéricas. Sin embargo, los conocimientos existentes están limitados al caso de los medios circundantes al sensor que presentan solamente un índice de refracción real. De igual forma, no existen resultados experimentales en los que se

consideren medios circundantes parcialmente transparentes, es decir, medios que presentan una notable absorción. La absorción de un medio da origen a un índice de refracción complejo.

Teniendo en consideración lo anterior, en este trabajo se investiga los efectos en las mediciones del sensor causados por la absorción de los medios no transparentes; a fin de verificar si efectivamente esta técnica de refractometría se vea afectada por medios no transparentes. Estos resultados podrán dar pie a un conjunto de conocimientos para que, en su caso, dichos efectos sean considerados en las aplicaciones del sensor.

Objetivo

Investigar experimentalmente los efectos de la absorción finita de muestras líquidas parcialmente transparentes sobre el funcionamiento del sensor refractométrico en fibras ópticas con un elemento de sensibilidad semiesférico.

Metas

- Diseño de una instalación experimental empleando un modelo físico del sensor refractométrico de fibras ópticas con elemento semiesférico que resulte práctica para la variación de parámetros geométricos del sensor.
- Implementación de la instalación experimental.
- Calibración de la instalación experimental implementada de acuerdo a los parámetros teóricos conocidos.
- Establecimiento de una metodología de estudio experimental de los efectos de la absorción finita de muestras líquidas sobre la respuesta del sensor.
- Desarrollo de experimentos cualitativos y cuantitativos a fin de investigar los efectos en la respuesta del sensor originados por la absorción finita de muestras líquidas.

Estructura de la tesis

Este trabajo consta de cuatro capítulos. En el primer capítulo se analiza el estado del arte en los métodos existentes para la medición del índice de refracción, la precisión que pueden proporcionar. Se describen los conceptos, tipos y propiedades de los sensores basados en fibras ópticas. Asimismo se hace una revisión del estado del arte de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas y se expone el principio de operación, los parámetros fundamentales y los resultados teóricos más importantes del sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento de detección semiesférico. Finalmente, se identifican algunos problemas existentes en el área de los sensores del presente tipo. Específicamente, se detecta que el problema de la absorción finita de la muestra bajo medición aun requiere su solución.

El segundo capítulo tiene su enfoque sobre los procesos de propagación y refracción de la luz en interfaces de diferentes medios ópticos. Asimismo, se describen los procesos físicos que dan pie al funcionamiento de las fuentes de luz, los detectores de radiación óptica y las fibras ópticas como medio de transmisión de la luz; ya que estos elementos forman parte de la estructura fundamental del sensor y tienen efectos importantes sobre las respuesta del sensor en las mediciones.

El tercer capítulo aborda la implementación de la instalación experimental del sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico. De las tres partes que la conforman, en el presente trabajo se ahonda en el subsistema electrónico; específicamente, el circuito fotorreceptor, mientras que se describe de manera general el subsistema mecánico y el subsistema óptico.

Los efectos de la absorción de muestras que puedan existir en el sensor refractométrico se investigan en el capítulo cuarto, donde se describen algunos antecedentes teóricos referentes a la absorción, se describe el desarrollo experimental y se muestran los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

Finalmente, en la última parte se esbozan las conclusiones generales de éste trabajo.

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación científica patrocinado por la DGAPA-PAPIIT de la UNAM sobre un sensor refractométrico en fibras ópticas con un elemento semiesférico de detección. En este proyecto participaron dos de mis compañeros estudiantes de la Facultad de Ingeniería los cuáles realizaron distintas tareas sobre la caracterización del sensor. Agradezco su colaboración en el proceso de implementación de la instalación experimental.

Capítulo 1

Refractometría en fibras ópticas

1.1 Introducción

El sensor refractométrico en fibras ópticas basa su funcionamiento en diversos principios ópticos. El presente capítulo tiene como objetivo analizar los principios de funcionamiento del sensor con la finalidad de determinar el estado actual de los conocimientos sobre este tipo del sensor e identificar los problemas aun no resueltos existentes en esta área.

En esta sección se describen los métodos para la medición del índice de refracción, la precisión que pueden proporcionar e igualmente se describen los conceptos, tipos y propiedades de los sensores basados en fibras ópticas. También se hace una revisión del estado del arte de los sensores refractométricos basados en fibras ópticas mencionando brevemente los principios de operación y las implementaciones de los mismos. Finalmente, se expone el principio de operación, los parámetros importantes y los resultados teóricos del sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico concebido por Svirid, Khotiaintsev y Swart [1].

1.2 Refractometría

La refractometría es la técnica que permite determinar la propiedad óptica *adimensional* de un material llamada índice de refracción. Los procedimientos para llevar a cabo esta medición aprovechan las diversas posibilidades de transmisión y reflexión de la luz en la muestra a investigar. Algunas de estas técnicas son empleadas únicamente en laboratorios, mientras que

otras fundamentan la operación de diversos refractómetros comerciales. Existen diversas compañías que fabrican estos refractómetros comerciales, principalmente instrumentos en donde el rango de índices de refracción que pueden medir está claramente delimitado por la aplicación de la que se trata. La mayoría de estos refractómetros comerciales emplean el método del ángulo crítico, que será descrito más adelante, de tal manera que la muestra pueda ser colocada fácilmente en contacto con el dispositivo. La resolución que ofrecen dichos refractómetros va de 10^{-3} a 10^{-4} [5].

Los refractómetros de laboratorios también suelen emplear el mismo principio de operación, con la ventaja de abarcar rangos de índice de refracción mayores, proporcionar lecturas en diferentes longitudes de onda y controlando estrictamente factores como la temperatura. Este tipo de refractómetros superan la precisión de los refractómetros comerciales en al menos una decena de veces, sin embargo su costo se proyecta en el mismo orden.

1.2.1 Métodos de refractometría

1.2.1.1 Método por Interferometría

Considerese un interferómetro de dos haces, tales como el interferómetro de Michleson, Rayleigh o Jamin. Se coloca una muestra con una geometría de caras paralelas en el plano, de longitud z y con un índice de refracción n en uno de los haces del interferómetro, sufriendo un retraso de fase de magnitud $2\pi n z / \lambda_o$; mientras que el otro haz al encontrarse en el aire presenta un retraso de magnitud $2\pi n_{aire} z / \lambda_o$. Entonces, la diferencia de fase del haz que atraviesa el material con respecto a la propagación del otro haz en el aire, está dada por:

$$\delta = \frac{2\pi(n - n_{aire})z}{\lambda_o} \quad (1.1)$$

donde en forma práctica $n_{aire} = 1$. Esta diferencia puede ser medida realizando un ajuste mediante un compensador de fase en el haz de referencia para volver a obtener el patrón de interferencia de orden cero, y por medio de la ecuación 1.1 el índice de refracción de la muestra puede ser calculado.

Otras técnicas emplean el conteo directo de las franjas en el patrón de interferencia, correspondiendo cada una a cambios de fase δ en $\pi[rad]$. Por inspección visual se pueden medir fracciones de 0.1 franjas, y empleando métodos electro-ópticos se pueden medir hasta 10^{-6} de franja. Por ello, la precisión potencial del método es muy alta. Sin embargo, un interferómetro además de caro es delicado. La diferencia en la dispersión tanto de la muestra como del compensador puede acarrear problemas, tales como hacer invisibles las franjas. La solución a este problema consiste en emplear un compensador con dispersión semejante a la dispersión de la muestra o reducir la longitud z de la muestra pero ésta última opción implica reducción en la precisión.

El principal uso de éste método es para gases, donde la diferencia $n-1$ es aproximadamente 1000 veces menor que $n-1$ para sólidos y líquidos [5]. Es empleado también en refractometría diferencial de soluciones y en el caso de fluidos existen técnicas desarrolladas empleando interferómetro de Michelson.

1.2.1.2 Métodos de Desviación

Existen métodos de desviación lateral o angular que emplean la ley de Snell para obtener el índice de refracción. La desviación lateral ocurre cuando un haz de luz es transmitido a través de una muestra de caras paralelas de un ancho L .

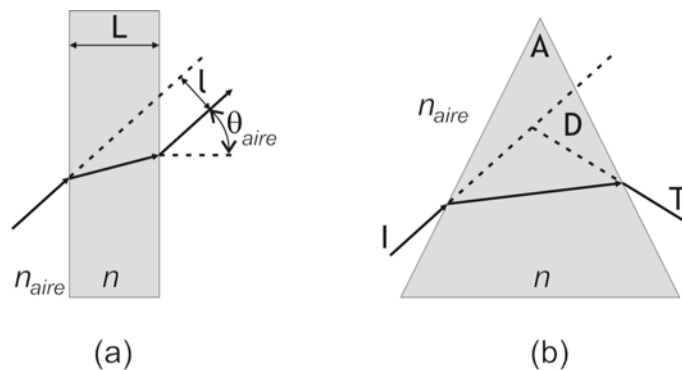


Figura 1.1. (a) Desviación lateral de un haz de luz al atravesar un medio con índice de refracción n ; (b) desviación angular en un prisma.

De acuerdo a los parámetros de la figura 1.1(a), se puede demostrar por medio de óptica geométrica que:

$$n = n_{\text{aire}} \sin \Theta_{\text{aire}} \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \Theta_{\text{aire}}}{\sin \Theta_{\text{aire}} - \frac{l}{L}} \right)^2} \quad (1.2)$$

Así, la precisión del método depende de la medición de los parámetros L , Θ_{aire} y principalmente de l . A través de dispositivos de detección electro-ópticos, es posible determinar un desplazamiento tal que se refleje en una precisión del índice de refracción de aproximadamente 0.001.

El método de desviación angular emplea la incidencia de la luz en una de las caras de la muestra en forma de prisma con índice de refracción n tal como se muestra en la figura 1.1(b). El haz de luz de salida se desvía en forma angular. En el ángulo de mínima desviación D se puede demostrar que:

$$n = n_{\text{aire}} \frac{\text{sen}\left(\frac{A+D}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (1.3)$$

La incertidumbre en el índice de refracción considerando una incertidumbre de medición de 1' en la medición del ángulo D es de 0.0003 [5], considerando un prisma cuya cara triangular corresponda a un triángulo equilátero; es decir, $A = 60^\circ$.

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.

1.2.1.3 Método del ángulo crítico

Como se mencionó con anterioridad, cuando existe una interfase entre dos medios, la ley de Snell determina la relación entre los ángulos de incidencia y transmisión de la luz con el índice de refracción de ambos medios. A partir de la medición del ángulo crítico es posible entonces determinar el índice de refracción de una muestra.

En la región del ángulo crítico, las ecuaciones de Fresnel muestran que la potencia óptica transmitida o reflejada varía en forma discontinua con el ángulo. Dicho ángulo puede ser medido con precisión alrededor de 10^{-4} o 10^{-5} [5]. Las muestras líquidas son colocadas directamente en una de las caras de un prisma refractométrico cuyo índice de refracción es conocido. Las muestras sólidas necesitan una cara plana y ópticamente pulida que es acoplada a la cara del prisma refractométrico mediante una capa líquida de índice de refracción intermedio. Para realizar la medición del ángulo crítico el método puede seguir el modo de transmisión o el modo de reflexión.

En el modo de transmisión, la interfase muestra-prisma es iluminada a través de la muestra y el ángulo crítico es el ángulo de transmisión mayor en el prisma. La transmitancia de la muestra al prisma es cero para $\Theta > \Theta_c$. El modo de reflexión ilumina la interfase prisma-muestra a través del prisma, donde la reflexión para $\Theta < \Theta_c$ es muy pequeña mientras que para $\Theta > \Theta_c$ la luz es 100% reflejada.

Este método es simple y robusto y por ello persiste como método preferido de los refractómetros comerciales [5].

1.2.1.4 Método del ángulo de Brewster

Las ecuaciones de Fresnel de reflexión en una interfase entre dos medios muestran que si la luz incidente está linealmente polarizada con su campo eléctrico en el plano de incidencia, existe un ángulo para el cual no hay luz reflejada [22], tal que:

$$\Theta_B = \text{ang tan} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.4)$$

El ángulo de Brewster Θ_B es medido para la condición de inexistencia de luz reflejada polarizada linealmente por la superficie de la muestra. (figura 1.2). La ecuación 1.4 permite obtener el índice de refracción de la muestra, donde n_1 es el índice de refracción del medio que contiene la luz incidente, típicamente aire, y n_2 es el índice de refracción desconocido.

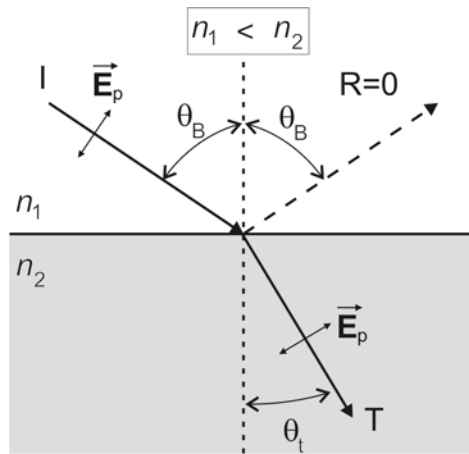


Figura 1.2. Ángulo de Brewster.

La luz es polarizada linealmente de tal forma que el campo eléctrico vibre paralelo al plano de incidencia, por ejemplo, la luz de un láser monocromático linealmente polarizado. Para usar fuentes no polarizadas, es necesario polarizadores como el prisma Glan-Thomson o polarizadores dicróicos. Empleando un láser de HeNe de 1 mW de potencia y por inspección visual de reflectancia mínima, una precisión en Θ_B de 0.1° puede ser obtenida, dando una precisión del índice de refracción de la muestra de 0.005. Empleando métodos fotométricos la precisión puede incrementarse en factores de 10 a 100 veces [5]. Esta precisión es comparable a la precisión del método del ángulo crítico, con la ventaja de no requerir un material de referencia con índice de refracción mayor al de la muestra y bien conocido como lo es el prisma, sin embargo no se conocen refractómetros comerciales basados en este principio.

1.2.1.5 Método por acoplamiento de índice de refracción

Este método tiene la ventaja de no requerir que la muestra tenga determinada forma, sin embargo es útil para sólidos solamente. La muestra puede ser dividida finamente como polvo. Asumiendo que las partículas son isotrópicas y homogéneas, la radiación reflejada, la desviación angular o lateral, y el cambio de fase de la luz transmitida se vuelve nula cuando existe acoplamiento de índices de refracción. El material se agrega en un líquido el cual no debe disolver, pernear o reaccionar con la muestra sólida.

Este método proporciona una precisión aproximada de 0.005 en el índice de refracción por inspección visual [5].

1.2.2 Aplicaciones de Refractometría

El índice de refracción está ligado a la concentración de materia disuelta o suspendida en una solución o suspensión, respectivamente. Por esta razón, la refractometría ofrece la posibilidad de obtener mediciones de concentración.

1.2.2.1 Salinidad

La salinidad es una propiedad del agua que se mide principalmente en aplicaciones ambientales, tal como la oceanografía, o industriales. Existen varios desarrollos de instrumentación para monitoreo de salinidad y otros parámetros también usados para evaluar la calidad del agua. Los sensores de salinidad se pueden auxiliar de una cantidad secundaria basada en procesos eléctricos, ópticos o químicos.

Existen dos formas de expresar la concentración en masa de las especies disueltas (solutos) en una solución. La primera es especificar la concentración en unidades de masa de soluto en un volumen unitario de solución, lo que se denomina base masa/volumen. La segunda es una base masa/masa, o sea, la masa de soluto en una masa determinada de solución. Ambas formas son empleadas para determinar la salinidad, siendo las más empleadas:

$$ppt = \frac{\text{Masa de sustancia (g)}}{\text{Masa de solución (kg)}}$$

$$ppm = \frac{\text{Masa de sustancia (mg)}}{\text{Masa de solución (kg)}}$$

La cantidad física secundaria más empleada para medir la salinidad es la conductividad, aunque es solamente útil para solutos iónicos. En esta propiedad se basan los diversos medidores de salinidad disponibles en el mercado. También es posible determinar la salinidad de una solución mediante la medición del índice de refracción. El índice de refracción de una solución cambia con la salinidad a una razón de 2×10^{-4} por cada 1‰ de salinidad a una temperatura constante; pero también se ve afectado el índice de refracción por cambios de temperatura, tal que a una concentración de salinidad constante, el índice de refracción decrece de 0.5×10^{-4} a 1×10^{-4} por cada grado centígrado dependiendo del rango de temperaturas de operación [6].

1.3 Sensores en fibras ópticas

Es conocido que el desarrollo de las fibras ópticas y los dispositivos optoelectrónicos impactaron a la industria de las comunicaciones de tal manera que hoy en día existen miles de kilómetros de cables ópticos tendidos con estos fines. Sin embargo, las posibilidades que ofrecen las fibras ópticas van más allá de la transmisión de datos. Cuando una fibra óptica es empleada en el campo

de las telecomunicaciones, el objetivo es transmitir la mayor cantidad de información posible en altas tasas de transferencia y con la menor atenuación posible. La fibra puede estar sujeta a variaciones físicas como esfuerzos, presiones, curvaturas o inmersa en un ambiente donde varían las condiciones de presión, temperatura, humedad, etc. Estas condiciones resultan poco favorables en un sistema de comunicaciones, pero en un sistema de sensores de fibra óptica, dichas condiciones son el objeto de estudio, ya que modifican las características de la onda de luz a medida que se propaga.

1.3.1 Conceptos básicos

Un sensor en fibras ópticas es un dispositivo capaz de convertir una cantidad física variable en una señal óptica modulada. Para propósitos de medición, la señal de salida es generalmente calibrada contra una cantidad física conocida. El sensor entonces se convierte en un instrumento secundario para medición de dicha cantidad. La figura 1.3 muestra una vista esquemática de los elementos fundamentales de un sensor de fibras ópticas. El elemento sensor S mostrado puede ser una fibra óptica o bien cualquier otro elemento óptico externo.

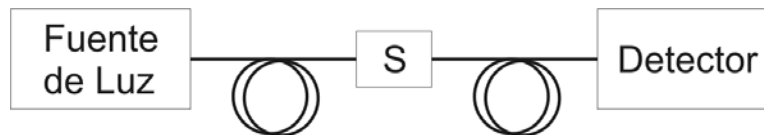


Figura 1.3. Configuración básica de un sensor de fibras ópticas. S representa el elemento sensible.

El elemento sensor S de la figura SENSOR puede ser descrito formalmente por una matriz de propagación $M(V, \lambda)$, que depende del ambiente físico V (el cual a su vez depende de todos los parámetros físicos externos a considerar) y a su vez de las características espectrales del medio de transmisión de acuerdo a la longitud de onda en la que emite la fuente. Esa matriz de propagación puede ser descrita por:

$$M(V, \lambda) = Te^{\phi} B \quad (1.5)$$

El término T es la transmitancia escalar, el parámetro ϕ representa el retardo de fase y B representa la birrefringencia¹ del elemento sensor. Así, Las características de la onda de luz que pueden ser modificadas son la fase, la polarización y la intensidad.

1.3.2 Tipos de Sensores

Los sensores en fibras ópticas suelen clasificarse dependiendo de la naturaleza del elemento de sensado. Existen fundamentalmente dos tipos de sensores en fibras ópticas: los sensores *intrínsecos* y *extrínsecos*. En los sensores intrínsecos, el elemento de sensado es la propia fibra

¹ La birrefringencia es una propiedad de los materiales anisotrópicos donde son refractadas dos ondas con dos polarizaciones y dos direcciones de propagación distinta. También es llamada doble refracción.[2]

óptica y los parámetros de la luz son modificados sin que ésta abandone la fibra. En los sensores extrínsecos, la cabeza de sensado es un elemento óptico que puede ser completamente diferente, lo que conlleva a estructuras híbridas. En estos sensores, la luz abandona una fibra óptica para interactuar con el medio externo a través del elemento y posteriormente es recogida por otra fibra óptica (en algunos sistemas se emplea la misma fibra óptica de entrada) y posteriormente procesada.

Además de los sensores diseñados para medir un parámetro en determinada ubicación, existen los *sensores multiplexados*, que permiten realizar mediciones en distintas ubicaciones. En este sentido, cabe destacar que ningún sistema convencional de sensores tiene la capacidad de los sensores de fibras ópticas para realizar verdadero *sensado distribuido*, para detectar simultáneamente no solamente la magnitud del factor de modulación de la onda, sino también la ubicación precisa e incluso la distribución espacial de la misma.

En los sensores cuyo funcionamiento esta basado en la modificación de la fase de la luz se denominan interferométricos, ya interviene el empleo de interferómetros en uno de los bloques del sistema. La fuente de luz empleada en estos dispositivos debe ser coherente (típicamente láser). Su geometría flexible y su alta sensibilidad permiten la posibilidad de una gran variedad de arreglos. De igual forma, un tipo de sensores de fase son los sensores polarimétricos, en donde los cambios en la polarización de la luz son detectados. En este tipo de sensores se presenta una diferencia de fase entre dos componentes de campo eléctrico de la luz que se propaga en una fibra de tipo birifringente.

En los sensores que detectan cambios en la longitud de onda por efectos del medio externo se encuentran aquellos basados en fluorescencia, en donde el haz incidente interactúa con el material fluorescente, emitiendo en otra longitud de onda de tal manera que esta radiación también es captada y por medio de filtros puede ser detectada.

Los sensores en fibras ópticas más simples son los sensores de intensidad y por ello ofrecen la posibilidad de desarrollar dispositivos de menor costo. En este tipo de sensores, la interacción con el medio induce pérdidas a la señal óptica que se manifiesta como una atenuación de la misma. Pueden emplear cualquier tipo de fibra óptica, el uso de fuentes no coherentes resulta adecuado y las unidades de detección resultan simples de implementar. La principal desventaja que presentan es la inestabilidad de la señal analógica, como fluctuaciones en la intensidad y longitud de onda de la fuente de luz, o cambios no controlados (por ejemplo por variaciones de la temperatura) en la respuesta del detector, las pérdidas de la fibra y en los conectores.

1.3.3 Ventajas de los sensores en fibras ópticas

Debido a su naturaleza dieléctrica y a los materiales empleados en los sensores de fibras ópticas, las ventajas inherentes que presentan son:

- Inmunidad intrínseca a interferencia electromagnética
- Ausencia de conductividad eléctrica
- Alta resistencia a la corrosión química

- Capacidad de operación en ambientes con altas temperaturas
- Seguridad contra riesgos de fuego o explosión
- Posibilidad de realizar elementos sensores en miniatura
- Posibilidad de realizar sensado remoto, construyendo sensores capaces de transmitir en distancias considerablemente grandes entre la cabeza del sensor y el sistema interrogador de tal manera que los componentes eléctricos se encuentren lejos de ambientes peligrosos.
- Compatibilidad con los sistemas de comunicaciones ópticas.

1.3.4 Estado del Arte de sensores refractométricos en fibras ópticas

Por las ventajas que presentan los sensores en fibras ópticas mencionadas con anterioridad, diversos sensores refractométricos que se encuentran en proceso de desarrollo procuran emplear esta tecnología.

Un sensor en fibras ópticas basado en rejillas de Bragg [7] y rejillas de Bragg de período largo han sido propuestos [8]. Cuando el revestimiento de una fibra óptica con rejillas de Bragg es reducido, se presentan cambios significativos en el índice efectivo debido a las modificaciones del índice de refracción del medio que la rodea, lo que produce desplazamientos en la longitud de onda de resonancia de Bragg ya que $\Lambda_B = 2n_{eff}\lambda$. La precisión del sensor va de 10^{-4} a 10^{-5} alrededor de $n=1.333$ y $n=1.450$.

Otro sensor refractométrico ha sido propuesto basado en la resonancia superficial de plasmones [9]. La resonancia de plasmones es un fenómeno en el cual las ondas de plasma de superficie son excitadas en una interfase metal-dieléctrico. En este sensor, se hace incidir un haz colimado de luz monocromática en la fibra de entrada y cuyo ángulo de incidencia es variado. En un ángulo específico, la potencia óptica es atenuada por la transferencia de energía a los plasmones, El índice de refracción puede entonces ser obtenido a partir de las mediciones de potencia óptica contra el ángulo de incidencia.

Otro sensor propuesto [10] 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 tal que las pérdidas en la potencia óptica que ocurren en la fibra se deben a efectos de transmisión y reflexión (parcial o total interna); consta de una fibra de perfil de índice escalonado que 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. La precisión del sensor es de 2×10^{-3} , usando gotas sobre la superficie pulida, y de 5×10^{-3} sumergiéndolo en el líquido, y opera en el rango de índices de refracción de 1.30-1.59.

Un sensor propuesto [11] opera en el rango de índices de refracción de 1.36 a 1.46 con una precisión de 10^{-4} . Éste emplea una fibra óptica multimodo que es adelgazada en un tramo de longitud L, de tal manera que los diámetros de núcleo y revestimiento se reducen. Para

determinado grosor de la sección adelgazada, ciertos modos propagados no satisfacen la condición de reflexión total interna dentro del núcleo de la fibra y entonces son radiados fuera del núcleo. Sin embargo, esos modos pueden ser guiados por el revestimiento si satisfacen las condiciones de reflexión en la interfase revestimiento-medio. Para que dichos rayos puedan ser guiados, se debe cumplir que el índice de refracción del revestimiento sea mayor que el índice de refracción del medio. La fuente de luz que emplea es un LED.

También para la determinación de índices de refracción en fluidos, un sensor en fibras ópticas es propuesto para la medición en aceite [12]. En este caso, la cabeza del sensor consiste en una fibra óptica multimodo de longitud corta (5 cm) de tal manera que el revestimiento de una sección es removido empleando ácido fluorhídrico. El principio de operación se basa en que el cambio de índice de refracción en el medio circundante modifica la atenuación de los modos guiados que se propagan en la fibra. Este sensor puede ser empleado bajo una configuración de autoreferencia mediante un interferómetro de Michelson. Los autores presentan resultados en el rango de índices de refracción de 1.47 a 1.64 sin embargo no es especificada la precisión.

Uno de los métodos usados para la detección de la concentración de sal en una solución acuosa a través de la medición del índice de refracción se basa en un método de desviación de un haz de luz al ser transmitido por un sensor en fibras ópticas [13]. El arreglo está constituido por una fuente de luz (un diodo láser) las fibras ópticas de entrada y salida, un dispositivo sensible a la posición, y como elemento óptico un celda de prueba basada en un prisma. Con el dispositivo sensible a la posición se mide la desviación del haz de luz debido al cambio del índice de refracción de la muestra, el cual es proporcional al índice de refracción. Una de las ventajas que presenta es que la señal de salida de ese dispositivo es independiente de la intensidad del haz de luz ya que solo se relaciona con su posición.

1.4 Sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico

1.4.1 Principio de operación del sensor

El sensor refractométrico con elemento semiesférico de detección [1] es un sensor en fibras de tipo extrínseco. Los elementos que conforman el sensor se muestran en la figura 1.4.

La fuente de radiación óptica (1) emite un haz que incide en una fibra óptica de entrada o emisora (2). El haz se propaga por la fibra y es transmitido al elemento óptico de detección (3) que será puesto en contacto con el medio circundante de índice de refracción n a fin de realizar la transducción. La luz que se propaga dentro del elemento óptico incide de tal manera que en algún momento encuentra una interfase entre el elemento óptico de detección y el medio. En este punto los rayos podrán ser transmitidos o reflejados internamente dependiendo del ángulo con que incidan en la frontera. Los rayos que son transmitidos se pierden, en tanto que los rayos que son reflejados internamente continúan su propagación en el elemento óptico. Este proceso se repite para los rayos que viajan por el elemento, de tal manera que la intensidad de luz que llega a la fibra óptica de salida o receptora (4) dependerá de la cantidad de rayos que puedan alcanzar este punto y la cantidad de reflexiones que hayan experimentado. Finalmente, los rayos de luz que son

aceptados por la fibra óptica receptora son transmitidos hacia el dispositivo fotorreceptor (5), que a su vez está conectado a un amplificador electrónico, a fin de realizar la transducción óptica a electrónica y poder hacer un procesamiento de datos.

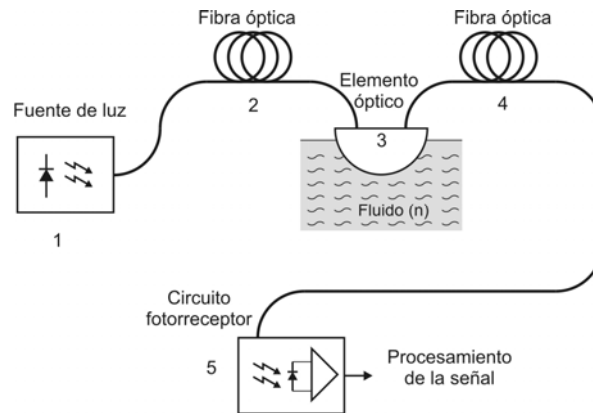


Figura 1.4. Esquema del sensor refractométrico de fibras ópticas. (1) - fuente de radiación óptica, (2) - fibra óptica emisora, (3) - elemento óptico transductor, (4) - fibra óptica receptora, (5) - fotorreceptor.

La operación del sensor se basa en la variación de la intensidad de la luz que se propaga por el elemento óptico transductor. Esta intensidad varía según las condiciones para la reflexión interna de la luz en la frontera entre el material del elemento transductor y el medio que lo rodea.

En el presente desarrollo, se considera un elemento de detección semiesférico. Este tipo de elemento presenta algunas ventajas inherentes a su forma geométrica ya que, al tratarse de un funcionamiento bajo reflexión total interna, este elemento tiene propiedades de enfoque y mejora el acoplamiento entre las fibras ópticas involucradas.

1.4.2 Definición de parámetros

Las características de propagación de la luz en el sensor dependen fuertemente de las dimensiones de los elementos. Por ello, es necesario definir parámetros sobre las características físicas del sensor así como sobre características de su funcionamiento respecto a la manipulación de la señal óptica. En el caso de las características físicas del sensor es conveniente el empleo de parámetros adimensionales relacionados a la dimensión del elemento fundamental del sensor. Así, los modelos experimentales del sensor pueden ser fabricados en gran escala o en miniatura, conservando las propiedades de un diseño determinado.

1.4.2.1 Parámetros físicos

Considérese la figura 1.5 donde se pueden distinguir los elementos ópticos del sensor y las dimensiones físicas importantes. El elemento óptico queda definido geoméricamente por el radio R de la semiesfera, y las cantidades estarán referidas al mismo.

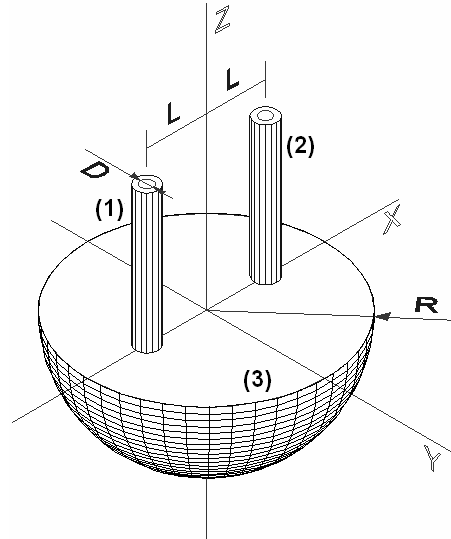


Figura 1.5. Esquema tridimensional del transductor donde se muestra: (1) – fibra óptica de entrada; (2) – fibra óptica de salida; y (3) – elemento semiesférico de detección.

De las fibras ópticas (1) y (2) resulta fundamental el diámetro del núcleo, de tal manera que el diámetro relativo de las fibras ópticas se define como:

$$\Phi = \frac{D}{R} \quad (1.6)$$

De igual forma, otro parámetro a variar es la separación que existe entre las fibras ópticas respecto a un eje central, tal que las fibras siempre se encuentran opuestas diametralmente y en forma simétrica respecto a dicho eje. La distancia entre las fibras ópticas relativa al radio del elemento entonces será:

$$\Lambda = \frac{L}{R} \quad (1.7)$$

De esta manera, los parámetros Φ y Λ son cantidades *adimensionales*.

1.4.2.2 Parámetros ópticos

Dado que el sensor refractométrico está basado en la modulación intensidad óptica por efectos del medio, es importante realizar algunas acotaciones necesarias. La estructura del sensor presentada anteriormente permite observar que existe una serie de acoplamientos ópticos entre los elementos del sensor. Estos acoplamientos tienden a presentar atenuación de la señal óptica y es independiente del comportamiento del sensor en la presencia de un medio con índice de refracción n .

Se define cantidad, llamada *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, es decir:

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (1.8)$$

siendo I_1 la intensidad óptica de entrada al elemento óptico por la fibra emisora, e $I_2(n)$ la intensidad óptica de salida, esto es, la aceptada por la fibra receptora. Este parámetro puede ser expresado en decibels:

$$T(n)(dB) = 10\log_{10} T(n) \quad (1.9)$$

Esta función de transferencia define el funcionamiento del sensor, sin embargo no es posible medir en forma práctica la intensidad óptica que incide en el elemento óptico, ni medir la potencia óptica que incide directamente en la fibra receptora por la estructura del sensor. La única potencia que es posible conocer es la potencia incidente en el fotodetector. A fin de poder establecer una cantidad práctica al momento de realizar la medición, se considera la transmisión en el aire, es decir:

$$T_{aire}(n) = \frac{I_{2aire}}{I_1} \quad (1.10)$$

donde I_{2aire} y T_{aire} son la intensidad óptica de salida y la transmisión del transductor, respectivamente, cuando el medio externo es aire. Esto permite definir la cantidad llamada *transmisión relativa (al aire)* como

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{aire}} = \frac{\frac{I_2(n)}{I_1}}{\frac{I_{2aire}}{I_1}} = \frac{I_2(n)}{I_{2aire}} \quad (1.11)$$

Hacer relativa la transmisión de un medio relativa a la transmisión 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. Esto debido a que las fibras ópticas de entrada y de salida y los acoplamientos entre elementos contribuyen con la misma atenuación en ambos casos; así, la transmisión relativa $T^*(n)$ muestra solamente los efectos de atenuación de la señal óptica asociados al medio externo y por consiguiente debidos a su índice de refracción. Por esta razón resulta conveniente usar la transmisión relativa para estudiar experimentalmente las características del transductor. De igual forma, la transmisión relativa también puede ser expresada en decibels:

$$T^*(n)(dB) = 10\log_{10} T^*(n) \quad (1.12)$$

1.4.3 Resultados Teóricos de estudios previos del sensor

El sensor refractométrico con elemento semiesférico de detección fue concebido y analizado teóricamente [1] mediante simulaciones numéricas para indagar sobre las características de transmisión. El análisis se enfocó al comportamiento del elemento semiesférico y los parámetros que definen al sensor, de tal manera que se emplea un modelo matemático del elemento de tres

dimensiones y realizando numéricamente el trazado de rayos. El modelo tomó en cuenta la descripción de la superficie de trabajo del sensor, las coordenadas iniciales del rayo elemental, la definición de las coordenadas del punto de intersección con la superficie, el ángulo de incidencia del rayo, la potencia del rayo reflejado, calculándose en cada punto de reflexión el coeficiente de reflexión de Fresnel, y finalmente la verificación del alcance del rayo reflejado. Asimismo toma en cuenta la posición de las fibras ópticas, el diámetro del núcleo de las fibras, y la divergencia del haz incidente. Se supone una distribución de luz uniforme del haz de luz, siendo ésta monocromática, no polarizada y no coherente; y formado por 100 000 rayos. Así, dependiendo de los parámetros mencionados y tomando la contribución de cada rayo, se obtiene la transmisión $T(n)$.

La figura 1.6 muestra las curvas obtenidas suponiendo la superficie de la semiesfera totalmente reflejante, variando fundamentalmente Φ y λ . Se observan zonas de transmisión correspondientes a valores máximos de transmisión debidos al acoplamiento óptico de las fibras.

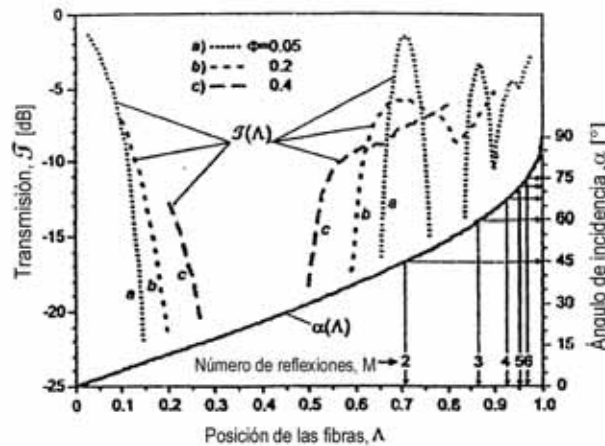


Figura 1.6. Transmisión absoluta contra el parámetro λ , para el caso ideal de la superficie semiesférica totalmente reflejante, con $AN=0.2$ y : a) $\Phi=0.05$, b) $\Phi=0.2$ y c) $\Phi=0.4$. Se muestra el ángulo de incidencia de un rayo axial dependiente de λ , y el número de reflexiones M . [1].

Como se puede apreciar, el ángulo de incidencia en la superficie está ligado a la posición relativa de las fibras ópticas y la cantidad de reflexiones M que se presentan en el elemento. La tabla 1.1 contiene los puntos de acoplamiento.

Tabla 1.1: número de reflexiones M de un rayo axial sobre la superficie semiesférica totalmente reflejante, así como su ángulo de incidencia y la posición de las fibras correspondiente.

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

La primera zona de transmisión es un caso físicamente no realizable donde idealmente las fibras ocuparían la misma posición y dada la naturaleza reflejante del elemento considerado se obtiene una reflexión. Sin embargo el resultado fundamental es que, a partir de la segunda zona de transmisión, se dan las condiciones para que exista reflexión total interna, lo cual resulta de interés para la aplicación práctica del sensor. La figura 1.7 muestra los resultados de la simulación de la transmisión relativa T^* [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.

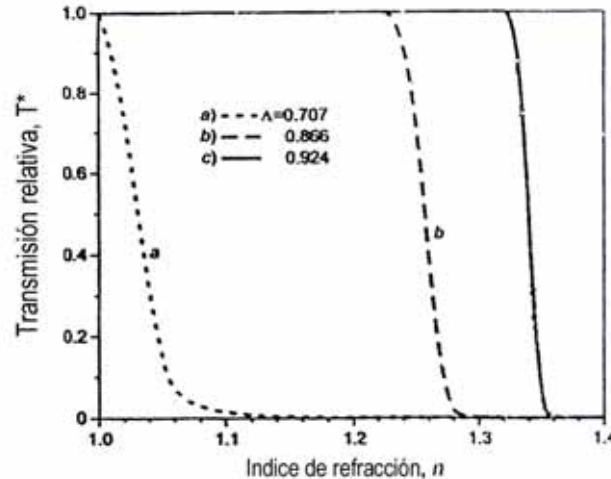


Figura 1.7: transmisión relativa contra índice de refracción del medio externo n . Posición de la fibra: a) $\Lambda=0.707$, b) $\Lambda=0.866$ y c) $\Lambda=0.924$; con $AN=0.2$ y $\Phi=0.05$. [1].

En estos resultados destaca que las posiciones relativas de las fibras ópticas son un factor importante para definir el rango de índices de refracción que pueden ser medidos, para un índice de refracción del elemento óptico determinado.

La respuesta de un sensor real depende no solamente de los parámetros geométricos y ópticos del elemento óptico de detección, sino también de las características de todos los elementos que lo conforman, esto es, la fuente de luz, el elemento fotodetector y las fibras ópticas.

Todos los resultados mencionados en este capítulo corresponden al caso de muestras completamente transparentes. Sin embargo, la absorción finita de una muestra puede resultar en una modificación en la respuesta del sensor lo cual conllevaría a la medición errónea del índice de refracción.

Los datos existentes en la bibliografía científica sobre este problema no son suficientemente detallados; en particular, no hay datos que corresponden al sensor refractométrico que se considera en el presente trabajo.

1.5 Conclusiones

En los últimos años se ha llevado a cabo una extensa investigación en varios tipos de sensores basados en fibras ópticas, debido a las ventajas inherentes mencionadas con anterioridad. Sin embargo, muchas de las ideas estudiadas permanecen simplemente como ideas, sin implementación práctica con aplicaciones en ambientes reales. El reto es precisamente consolidar esas aplicaciones, ya que la investigación de tecnologías de sensores de fibras ópticas con aplicaciones industriales aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo.

El sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico tiene la ventaja de emplear un elemento que favorece el enfoque de la radiación óptica reflejada internamente gracias a su geometría. Asimismo, los resultados teóricos prueban su versatilidad de rangos de operación, el cual deberá ser establecido de acuerdo a la aplicación. Así, con este sensor pueden ser medidos desde gases o fluidos con índices de refracción tan próximos al índice de refracción del aire, o bien materiales con índice de refracción elevado, limitado únicamente por el índice de refracción del elemento óptico de detección.

Uno de los principales problemas en el área de los sensores refractométricos es la absorción finita de las muestras que son objeto de medición. Las muestras parcialmente transparentes pueden dar pie a errores en la medición de índice de refracción bajo determinadas técnicas de refractometría. En la bibliografía científica existente no hay datos completos sobre los efectos de la absorción finita de las muestras en la respuesta del sensor refractométrico considerado.

Debido a que la respuesta del sensor depende en gran medida de las características de todos los elementos ópticos y electrónicos empleados en el sensor, en el siguiente capítulo se analizan las características principales de las fibras ópticas, las fuentes de luz y los fotodetectores que pueden ser empleados en un sensor refractométrico.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos de Sensores Ópticos

2.1 Introducción

La finalidad de este capítulo es analizar los efectos que puedan tener las características de las fibras ópticas, fuentes de luz, y dispositivos fotodetectores que se puede emplear en un sensor refractométrico, sobre la respuesta del sensor.

A continuación se analizan los procesos físicos inherentes al funcionamiento de las fuentes de luz, los detectores de radiación óptica y las fibras ópticas como medio de transmisión de la luz; así como las características principales de los elementos de sistemas ópticos más empleados en sensores ópticos.

2.2 Naturaleza de la radiación óptica

Las propiedades de la luz han sido estudiadas por la óptica a través de tres formas de descripción: la óptica geométrica, la óptica de onda y la óptica cuántica. La primera de ellas, trata a la luz desde el punto de vista geométrico, describiendo la propagación de la misma como rayos que viajan en trayectoria rectilínea y enfocándose únicamente a fenómenos donde es importante la dirección de propagación como la reflexión, la refracción y la dispersión. La óptica de onda estudia los fenómenos ópticos considerando la naturaleza de onda que tiene la luz, por ejemplo la interferencia, la difracción, la polarización y aquellos donde se involucra la naturaleza electromagnética de la luz. La óptica cuántica lidia con la naturaleza de la luz descrita como *paquetes* de energía llamados *fotones* describiendo fenómenos como la emisión estimulada, holografía, efectos magneto-ópticos y electro-ópticos entre otros.

2.3 Índice de refracción

El índice de refracción de una sustancia describe una parte importante de la interacción con la radiación electromagnética. Éste es una cantidad adimensional y real para materiales transparentes que define la propiedad de densidad óptica, de tal manera que se dice que un medio con un índice de refracción relativamente es ópticamente mas denso, mientras que un material con índice de refracción bajo se dice que tiene baja densidad óptica.

Desde el punto de vista geométrico, el índice de refracción de un medio óptico esta definido como la razón de la velocidad de la luz en el vacío a la velocidad de la luz en el medio, es decir:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

El índice de refracción depende generalmente de la dirección de propagación de la luz relativa a los ejes del material. Existen sustancias tales como los cristales los cuales poseen más de un índice de refracción, esto debido a su naturaleza anisotrópica. Por ello, el índice de refracción en su forma más general es un tensor. Muchas sustancias son isotrópicas y basta emplear un índice de refracción, mientras que algunas otras son ópticamente no homogéneas y poseen fluctuaciones en el índice de refracción en distancias comparables a la longitud de onda. Estos materiales pueden dispersar la luz y parecer turbios.

2.4 Propagación de la radiación óptica

2.4.1 Ley de reflexión y refracción

Siempre que un rayo de luz incide en la frontera que separa dos medios diferentes, parte del rayo es reflejado al primer medio y el restante es refractado conforme entra al segundo medio, como se muestra en la figura 1.1. Las direcciones de estos rayos están descritas por las leyes de reflexión y refracción. De acuerdo a la más simple de las leyes, el ángulo con el cual un rayo incide una interfase es el mismo ángulo con el que resulta el rayo reflejado, respecto a la normal de la superficie. Asimismo, es importante destacar que el rayo reflejado, la normal a la superficie y el rayo incidente se encuentran en el mismo plano

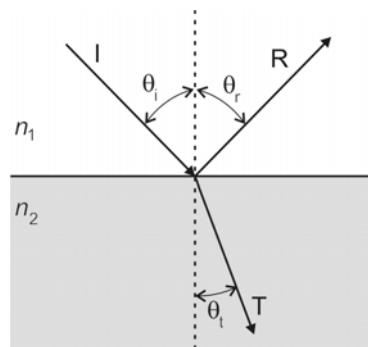


Figura 2.1. Transmisión y reflexión de un rayo incidente en una frontera.

Por otra parte, la ley de Snell establece la relación entre los ángulos incidente y refractado, de tal manera que el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción mantienen una razón constante para todos los ángulos de incidencia tal que:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

2.4.2 Reflexión total interna

Cuando la luz se propaga de un medio ópticamente menos denso a un medio ópticamente más denso, el ángulo refractado es menor que el ángulo incidente. Conforme el ángulo de incidencia aumenta, éste tiende a ser paralelo a la interfase de los medios. En el caso límite cuando el ángulo de incidencia es de 90° respecto a la normal, el rayo es transmitido con un ángulo θ_c , tal como se muestra en la Figura 2.2(a), y no es posible que exista luz transmitida con ángulos de refracción cuyo valor sea mayor a dicho ángulo. Por esta razón el ángulo θ_c recibe el nombre de ángulo crítico, y puede ser obtenido al sustituir la condición $\theta_1 = 90^\circ$ en la ecuación de la ley de Snell, tal que:

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

De igual forma, se puede observar que cuando la luz se propaga de un medio ópticamente más denso a otro ópticamente menos denso, el haz incidente en el ángulo crítico se transmite al medio ópticamente menos denso en forma tangente a la frontera. Matemáticamente puede presentarse el caso en que la ley de refracción no proporciona un valor real para el ángulo de refracción θ_t . Para dichos valores, la luz incidente es reflejada prácticamente en su totalidad al primer medio y este fenómeno se conoce como *reflexión total interna*.

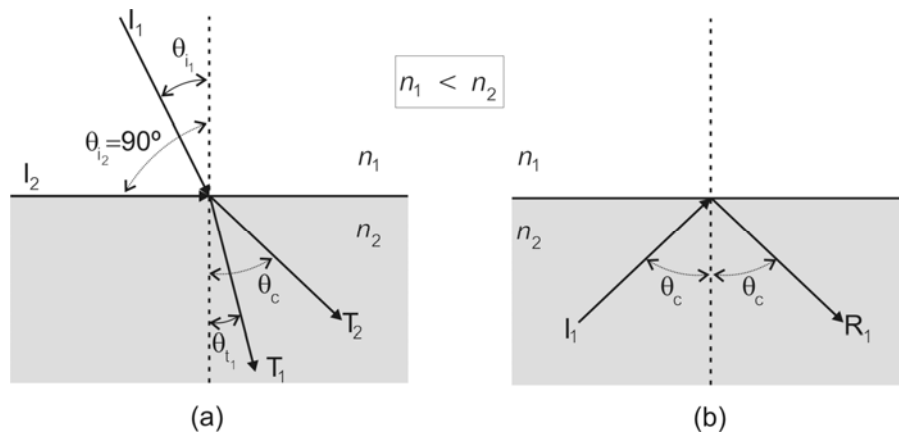


Figura 2.2. (a) Ángulo crítico. (b) Reflexión total interna en el ángulo crítico.

2.4.3 Reflectividad

Cuando una onda electromagnética cuyo campo eléctrico de la forma $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$, incide en la frontera entre dos medios, existe una cantidad de energía de esta onda que es reflejada y otra que es transmitida; estas porciones de la onda incidente están dadas por la *reflectancia* (R) y la *transmitancia* (T), que son la razón de flujo reflejado y transmitido al flujo incidente, respectivamente.

Al hablar de la *cantidad* de energía que incide sobre una superficie, se hace referencia al concepto de *irradiancia* (I) o densidad de flujo. Es definida como la energía media de la onda electromagnética por unidad de área por unidad de tiempo y se expresa en $[\text{W}/\text{m}^2]$. El valor promedio temporal de la magnitud del vector de Poynting \vec{S} para un tiempo mucho mayor que el periodo de la onda electromagnética, es una medición de la irradiancia, es decir, $I \equiv \langle S \rangle$.

La magnitud de \vec{S} esta definida como la potencia por unidad de área que cruza por una superficie cuya normal es paralela a dicho vector. Para una onda plana armónica, linealmente polarizada (las direcciones de los campos eléctrico \vec{E} y magnético \vec{B} son fijas) que viaja a través del espacio libre en la dirección \vec{k} y cuya energía fluye en la dirección de propagación (medio isótropo), se puede demostrar que la irradiancia es:

$$I = \langle S \rangle = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (2.4)$$

Si son definidos I_i e I_r como las densidades de flujo incidente y reflejado, respectivamente; y las áreas transversales de los rayos incidente y reflejado, respectivamente, como $A \cos \theta_i$ y $A \cos \theta_r$; entonces la potencia o flujo incidente y reflejado estarán dadas como: $I_i A \cos \theta_i$ e $I_r A \cos \theta_r$.

De las relaciones anteriores, la reflectancia, definida como la relación ente la potencia reflejada y la potencia incidente, esta dada por:

$$R \equiv \frac{I_r A \cos \theta_r}{I_i A \cos \theta_i} = \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{\frac{v_r \epsilon_r E_{0r}^2}{2} \cos \theta_r}{\frac{v_i \epsilon_i E_{0i}^2}{2} \cos \theta_i} \quad (2.5)$$

Dado que la onda reflejada incidente se encuentran en el mismo medio ($\epsilon_i = \epsilon_r$), por la ley de reflexión ($\theta_i = \theta_r$) y suponiendo materiales dieléctricos ($\mu_i = \mu_r = \mu_0$), la expresión de reflectancia se reduce a:

$$R = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Las relaciones entre las magnitudes del campo eléctrico reflejado y transmitido al campo eléctrico incidente están dadas por las ecuaciones de Fresnel [21]. Estas ecuaciones han sido desarrolladas particularmente para dos planos: cuando el campo eléctrico es paralelo y perpendicular al plano de incidencia, bajo la consideración que toda onda puede ser representada como la suma de estas dos componentes. Para materiales dieléctricos se puede considerar $\mu_i \approx \mu_t \approx \mu_0$, y los coeficientes de reflexión para la amplitud de la componente perpendicular y paralela están dados por las siguientes ecuaciones:

$$r_{\perp} \equiv \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.7)$$

$$r_{\parallel} \equiv \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.8)$$

La *reflectancia* puede ser definida en términos de estos coeficientes para cada uno de los planos mencionados, resultando:

$$R_{\perp} = r_{\perp}^2 \quad (2.9)$$

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2 \quad (2.10)$$

y se relaciona con la transmitancia tal que:

$$R_{\parallel} + T_{\parallel} = 1 \quad (2.11)$$

$$R_{\perp} + T_{\perp} = 1 \quad (2.12)$$

2.5 Fibras ópticas

En su forma más simple, una fibra óptica es una guía de onda cilíndrica dieléctrica fabricada en un material de baja pérdida, típicamente un núcleo cilíndrico de vidrio de silicio altamente puro, rodeado por un revestimiento cuyo índice de refracción es menor que el índice de refracción del núcleo. Este cambio de índice de refracción da pie a dos tipos principales de fibras ópticas: las fibras ópticas de perfil de índice escalonado y las fibras ópticas de perfil de índice graduado. La luz se propaga en las fibras ópticas debido al fenómeno de la reflexión total interna y viaja a través de ella en forma de modos, cada uno con distinta distribución espacial, constante de propagación, velocidad de grupo y fase. Por el número de modos que se propagan en una fibra, también se distingue a las fibras ópticas en fibras monomodo y fibras multimodo.

2.5.1 Fibras ópticas de perfil de índice escalonado

Considérese una fibra óptica con una estructura en la que el índice de refracción del núcleo n_1 decrece abruptamente a n_2 en el revestimiento, como las mostradas en la figura 2.3. Si un haz de

luz que viaja en el aire incide en el núcleo de la fibra con ángulo incidente θ_i , este sufrirá la refracción en la interfase de los medios, tal que el ángulo refractado θ_r , de acuerdo a la ley de snell, es:

$$n_0 \text{sen} \theta_i = n_1 \text{sen} \theta_r \quad (2.13)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del aire y n_1 es el índice de refracción del núcleo. El rayo refractado se propaga a través del núcleo hasta encontrar la interfase entre el núcleo y el revestimiento cuyo índice de refracción es n_2 . Para los rayos con ángulo mayor al ángulo crítico, se produce la reflexión total interna. Este fenómeno se repite a lo largo de toda la fibra, quedando confinados los rayos en el núcleo.

A partir del ángulo crítico en la interfase entre el núcleo y revestimiento, es posible determinar el ángulo máximo con el que puede incidir un rayo que se propaga en el aire. Se puede demostrar que:

$$n_0 \text{sen} \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.14)$$

En forma práctica, $n_0 = 1$ y a la cantidad $\text{sen} \theta_i$ se le conoce como apertura numérica. Al ángulo máximo incidente θ_i se le conoce como apertura angular. Esta cantidad resulta importante ya que describe la capacidad que tiene la fibra óptica para coleccionar la luz.

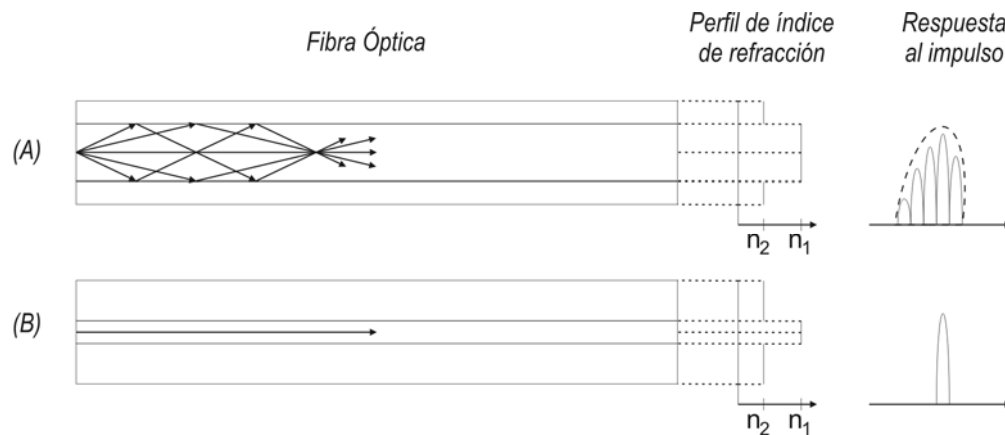


Figura 2.3. Fibras ópticas con perfil de índice escalonado: (a) multimodo (b) monomodo

Donde a es el radio del núcleo de la fibra, λ_0 es la longitud de onda del haz incidente, y AN es la apertura numérica. Se puede demostrar que si el valor de V es menor que 2.405, solamente un modo de propagación es permitido y ello determina la naturaleza de las fibras *monomodo*. [2]. Una de las ventajas que proporciona la propagación de un único modo es la eliminación de la dispersión modal. Cuando el parámetro V es mayor que 2.405, la propagación se da en varios

modos, y se habla entonces de fibras *multimodo*. Si dicho parámetro V es mucho mayor que 1, la cantidad de modos existentes se puede aproxima a $M=V^2/2$ [2].

2.5.2 Fibras ópticas de perfil de índice graduado

En este tipo de fibras ópticas, el índice de refracción en el núcleo varía gradualmente de un valor máximo n_1 , a partir del eje de la fibra, a un valor mínimo n_2 , en la frontera entre el núcleo y revestimiento. En este tipo de fibras, las trayectorias que siguen los rayos no son rectilíneas, sino curvas, con trayectorias más cortas que en el caso de las fibras de índice escalonado, como se muestra en la figura 2.4. El rayo axial viaja la distancia más corta con la menor velocidad de fase debido a que en ese punto se presenta la región con mayor índice de refracción, mientras que los rayos oblicuos viajan una mayor distancia, pero con mayor velocidad de fase ya que el índice de refracción es menor, de tal manera que los tiempos de retraso tienden a igualarse. Cuando la fibra tiene una graduación de índice óptima, los modos viajan prácticamente con las mismas velocidades de grupo. Si el parámetro V es grande, el número de modos puede aproximarse a $M=V^2/4$ [2].

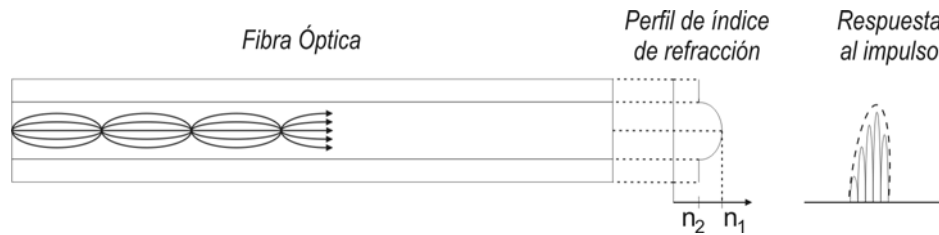


Figura 2.4. Fibra óptica con perfil de índice graduado.

2.6 Fuentes de radiación óptica

El elemento encargado de la emisión de señales ópticas es la fuente de luz, englobada en un dispositivo de transmisión encargado de realizar la conversión de una señal eléctrica a una señal óptica.

Por el origen de la radiación óptica, las fuentes de luz pueden ser agrupadas en dos grupos: las fuentes de emisión en espectro continuo, las fuentes monocromáticas (incoherentes y coherentes). Las primeras contemplan las fuentes de tipo incandescentes, que aprovechan el hecho de que todo cuerpo que se calienta emite energía radiante. Las fuentes monocromáticas pertenecen al grupo de fuentes luminiscentes y basan su funcionamiento en procesos de absorción de energía para posteriormente emitirla en forma de fotones. Este tipo de fuentes son preferidas sobre las fuentes incandescentes debido a su tamaño, potencia, tiempo de respuesta y emisión en determinadas bandas de longitudes de onda.

2.6.1 Procesos fundamentales de interacción entre luz y materia

Los fenómenos descritos por la óptica cuántica que determinan la emisión de radiación de las fuentes luminiscentes son la absorción, la emisión espontánea y la emisión estimulada.

Bajo condiciones normales, todos los materiales tienden a absorber la luz en lugar de emitirla. Este proceso de absorción puede ser descrito considerando niveles energéticos de los átomos del medio absorbente. El esquema más simplificado se muestra en la figura 2.5 e involucra dos niveles energéticos E_1 y E_2 . Este esquema permite describir los procesos electro-luminiscentes en un semiconductor, donde los distintos estados energéticos posibles de los electrones están divididos en bandas energéticas permitidas llamadas banda de conducción y banda de valencia, separadas por una banda prohibida.

Sea una partícula energética como un fotón o un electrón con energía definida por:

$$E_p = h\nu \quad (2.16)$$

donde la constante de planck $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Si dicha partícula incide en el material absorbente y su energía corresponde a la diferencia de energías tal que:

$$E_g = E_2 - E_1 \quad (2.17)$$

entonces el fotón o electrón es absorbido por el átomo, excitando a uno de sus electrones de tal manera que este salta del estado de menor energía al de mayor energía. El átomo excitado eventualmente volverá a su estado de energía basal emitiendo luz durante este proceso de forma espontánea o estimulada. Si la luz se produce por emisión espontánea, los fotones se emiten en direcciones aleatorias sin relación de fase entre ellas. Por el contrario, la emisión estimulada siempre es iniciada por un fotón existente, destacando que el fotón emitido tiene la misma frecuencia y fase.

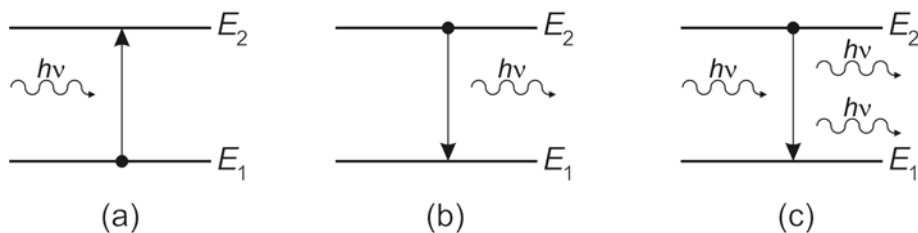


Figura 2.5. Procesos fundamentales en un esquema de dos estados de energía de un átomo: (a) absorción; (b) emisión espontánea; y (c) emisión estimulada.

2.6.2 Láser

El láser, acrónimo de Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation, es un oscilador óptico que presenta un material como elemento activo bajo un sistema de realimentación proporcionado por un resonador óptico.

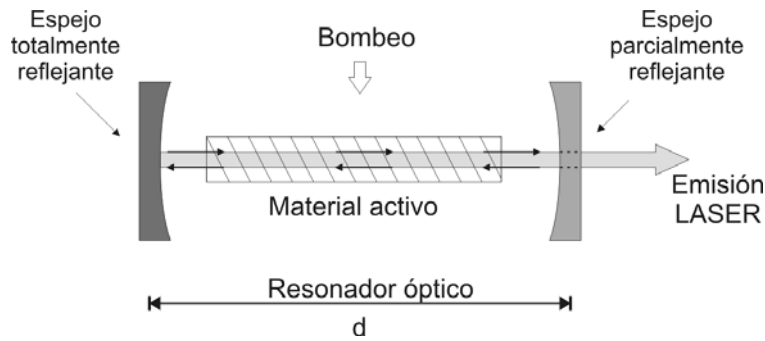


Figura 2.6. Diagrama simplificado de un láser.

El mecanismo principal por el cual se produce radiación óptica es la emisión estimulada en el material activo. Para describir mejor el proceso de emisión en un láser, es conveniente considerar un esquema de 3 niveles: un estado basal, un estado excitado y un estado meta estable (figura 2.7). La emisión estimulada puede ser dominante sobre la emisión espontánea si se cumple cierta condición llamada inversión de población. En condiciones de equilibrio térmico, puede ser demostrado que el nivel de energía basal contiene más electrones que el nivel excitado [2]. A fin de que exista emisión estimulada, es necesario que la distribución de densidades de electrones se encuentre invertida.

Por medio de la absorción se incrementa la energía del nivel basal al nivel excitado. Para alcanzar la inversión de población, es necesario *bombear* energía en forma óptica, química o eléctrica. Posteriormente, se presenta emisión espontánea, que reduce la energía al nivel meta estable, donde los electrones tienen un tiempo de vida más largo, y la emisión estimulada ocurre en el decaimiento de electrones del nivel meta estable al nivel basal.

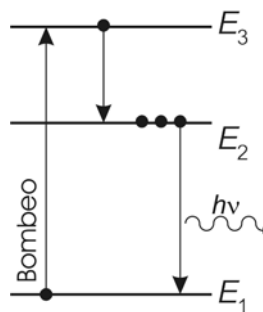


Figura 2.7. Modelo de tres estados para la emisión estimulada en un láser.

Una vez que se produce la emisión estimulada, es necesario realimentar los fotones emitidos a fin de sostener este proceso y para ello se emplea el resonador óptico. El resonador óptico, por ejemplo de Fabry-Perot, en conjunto con el material activo, definen los modos posibles de emisión. Para obtener la radiación óptica, uno de los dos espejos del resonador se diseña de tal forma que sea parcialmente reflectivo, como se puede observar en la figura 2.6.

2.6.3 Diodo emisor de luz (LED)

El diodo emisor de luz (LED por las siglas en inglés de Light Emitting Diode) es un diodo de juntura hecho de material semiconductor en el que bajo una polarización directa se induce la electroluminiscencia, de tal manera que la recombinación de pares electrón-hueco resulta en la emisión de un fotón por efectos de la emisión espontánea. La luz emitida es incoherente, con un ancho espectral en el orden de 30-60nm [3] y un patrón de radiación con un ancho de haz grande.

Uno de las características importantes del LED es la relación entre corriente eléctrica inyectada y la potencia óptica de salida. Generalmente, la relación entre estas dos cantidades es lineal dentro de un rango aceptable, como lo muestra la figura 2.8. Esta característica lineal puede variar su pendiente debido a la temperatura.

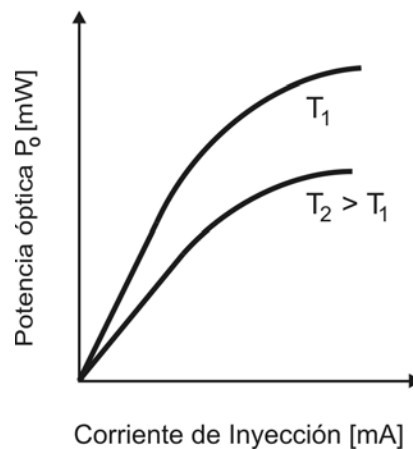


Figura 2.8. Respuesta óptica del led dependiendo de la corriente de inyección y la temperatura.

Existen dos tipos de estructuras de diodos emisores de luz. Si el diodo emite radiación de tal manera que ésta emerge del área en el plano de la capa de recombinación, se habla de un LED de emisión de superficie. Cuando la luz emerge por un costado, es decir, perpendicular a la capa activa, entonces se trata de un LED de emisión de borde.

Los diodos de luz pueden ser fabricados en diversos materiales semiconductores de acuerdo a la longitud de onda en que emiten. La tabla 2.1 muestra algunos materiales semiconductores empleados en la fabricación.

Tabla 2.1. Materiales semiconductores y rangos de longitudes de onda de emisión [4].

Tipo de 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
Irgan	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

El tipo de luz adecuada para comunicaciones ópticas depende de la distancia y el ancho de banda del sistema. Los LEDs son preferidos en determinadas aplicaciones por diversos aspectos: Emplean configuraciones sencillas para ponerlos en operación, son económicos, tienen un tiempo de vida largo y proveen la potencia necesaria aun cuando el ancho espectral es mucho mayor que el que presentan los dispositivos láser.

2.7 Fotodetectores

Los fotodetectores son los dispositivos encargados de convertir la señal óptica en señal eléctrica. Existen diversos tipos de fotodetectores, tales como los fotoconductores, fotomultiplicadores, detectores piroeléctricos y los fotodetectores semiconductores. Los fotoconductores y fotomultiplicadores emplean la fotoemisión externa, mientras los detectores piroeléctricos emplean la generación de calor, incrementándose su temperatura y cambiando por ello su estado de polarización. De los detectores, los de tipo juntura $p-n$ de semiconductor son los más empleados debido a que su tamaño es más reducido, emplean voltajes de operación considerablemente menores y tienen buena sensibilidad.

2.7.1 Fotodiodo

El fotodiodo es una juntura $p-n$ de material semiconductor. Toda juntura $p-n$ es sensible a la luz y puede realizar la conversión de señal óptica a eléctrica, sin embargo un fotodiodo se fabrica específicamente para este fin. Como dispositivo electrónico, su ecuación característica es:

$$i_D = I_{Dss} \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) - i_p \quad (2.18)$$

Esta es la relación conocida de un diodo, y solamente se considera adicionalmente el efecto de la fotocorriente.

Como se muestra en la figura 2.9. Existen tres formas de operar al fotodiodo: En modo fotovoltaico, en circuito corto y en modo fotoconductor. En el modo fotovoltaico, la luz genera pares electrón-hueco en la región de vaciamiento. Los electrones de la región n y los huecos de la región p en exceso comienzan a recombinarse, de tal manera que incrementa el campo eléctrico, produciéndose un voltaje, que crece a medida que aumenta el flujo de fotones. Este es el principio de operación de las celdas solares. En el modo de circuito corto, simplemente la corriente de corto circuito es la fotocorriente. El modo fotoconductor emplea al fotodiodo con polarización inversa, cuyo funcionamiento básico se describe a continuación.

Sea la juntura $p-n$ que se muestra en la figura 2.10(a). Cuando ésta es polarizada en inversa y se encuentra bajo iluminación, los fotones son absorbidos a lo largo de todo el material con un coeficiente de absorción α . En cualquier punto de la juntura donde un fotón es absorbido, se genera un par electrón hueco, pero solamente pueden ser transportadas aquellas cargas que se encuentren bajo el efecto de un campo eléctrico. Este campo eléctrico se encuentra presente en la región de vaciamiento, y por tanto, esa zona es donde se desea que se generen los portadores. Los

electrones y huecos generados fuera de la región de vaciamiento que son generados lejos de la región de vaciamiento terminan aniquilándose por recombinación, mientras que aquellos que se encuentran próximos a la región de vaciamiento pueden llegar a entrar a la región de vaciamiento por difusión aleatoria.

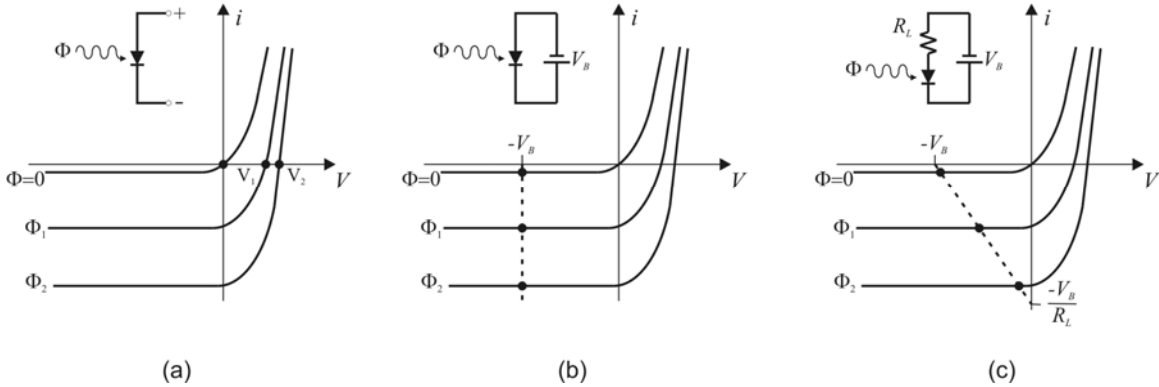


Figura 2.9. Modos de operación del fotodiodo: (a) fotovoltaico; (b) fotoconductor en circuito corto; (c) fotoconductor con resistencia de carga.

Los fotodiodos son más frecuentemente empleados en modo fotoconductor debido a que una fuerte polarización inversa crea un fuerte campo eléctrico en la juntura, lo cual incrementa la velocidad de arrastre de los portadores, reduciéndose el tiempo de respuesta. Asimismo, una fuerte polarización en inversa incrementa el ancho de la región de vaciamiento, reduciéndose la capacitancia de juntura e incrementándose el área fotosensible.

Entre las desventajas principales de los fotodiodos destacan dos: La capacitancia de la juntura cuyo valor es muy grande, limitando la detección de señales moduladas en altas frecuencias, y el tamaño reducido de la región de vaciamiento que reduce la eficiencia de conversión de fotones. Estas desventajas vienen a ser subsanadas por otro tipo de fotodiodos, llamados fotodiodos *p-i-n*.

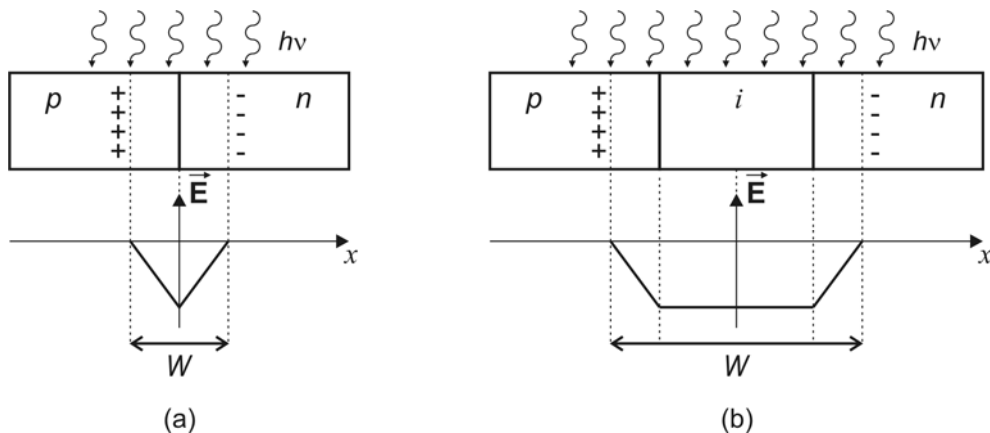


Figura 2.10. Esquema de la estructura de fotodiodos: (a) fotodiodo pn; (b) fotodiodo p-i-n.

2.7.2 Fotodiodo *p-i-n*

Es un fotodiodo semiconductor que en su estructura incluye una sección de material intrínseco dentro de la juntura *p-n*. La figura 2.10(b) muestra el esquema básico de este dispositivo. Esta capa intrínseca tiene mucho mayor cantidad de dopantes y respecto a sus dimensiones es considerablemente más ancha (típicamente 5-50 micrómetros) [2]. Debido a su naturaleza intrínseca la capa intermedia presenta alta resistencia y como resultado, el campo eléctrico es grande. El tamaño óptimo de la capa intrínseca involucra un compromiso entre ancho de banda y tiempo de respuesta.

2.7.3 Fotodiodo de avalancha APD

Los fotodiodos de avalancha son particularmente atractivos en aplicaciones donde la cantidad de potencia óptica de entrada es considerablemente reducida, debido a su diseño provisto de ganancia interna.

El fenómeno físico relacionado con la ganancia interna es conocido como impacto de ionización. Bajo ciertas condiciones, un electrón acelerado puede adquirir suficiente energía para generar un nuevo par electrón-hueco. El electrón altamente energizado cede una parte de su energía cinética a un electrón en la banda de valencia, de tal manera que este salta a la banda de conducción, dejando entonces un hueco.

Los fotodiodos APD difieren de los fotodiodos *p-i-n* en su diseño primordialmente en un aspecto: además de la capa intrínseca presente en el fotodiodo *p-i-n*, una capa adicional es agregada en la cual los pares electrón-hueco son generados por el impacto de ionización, pero la capa intrínseca se conserva como región de vaciamiento donde son absorbidos la mayoría de los fotones.

2.8 Efectos de los elementos ópticos en la respuesta del sensor

Además de los parámetros ópticos y geométricos del elemento óptico de detección, las diferentes características que presentan los elementos que pueden integrar al sensor, como las fibras ópticas, fuente de luz y fotodetectores, determinan en gran medida el comportamiento del mismo. Respecto a las fibras ópticas a emplearse, uno de los parámetros fundamentales es la apertura lineal, ya que determina considerablemente la forma respuesta del sensor. La curva de respuesta tiende a suavizarse mientras la apertura lineal crece, lo que impide la distinción entre los máximos de acoplamiento llegando incluso a fusionarse entre sí, resultando imperceptibles. Este mismo efecto se presenta cuando la apertura numérica de las fibras ópticas se incrementa. De esta manera, un diámetro del núcleo de las fibras pequeño y una apertura numérica pequeña permiten la existencia de un mayor número de zonas de transmisión.

La fuente de luz juega un papel muy importante en un sensor de fibras ópticas modulado en intensidad, ya que se requiere que la señal óptica sea estable y no presente variaciones que puedan producir modificaciones al momento de medir. En el caso de la elección de la fuente de luz, es necesario conocer si las características de la radiación óptica que produce se conservarán al pasar a través de todos los elementos del sensor y si dichas características influyen

considerablemente en la respuesta del sensor. Al tratarse de un sensor modulado en intensidad, la fuente de luz a emplear no requiere emitir radiación con características especiales respecto a la coherencia espacial, ancho espectral o polarización. Así, el sensor puede emplear como fuente de luz un diodo emisor de luz, el cual proporciona ventajas como el bajo costo, larga vida útil y potencia óptica relacionada linealmente con la corriente de alimentación dentro de un rango práctico; sin embargo, la emisión resulta con un ancho de haz divergente, lo que puede resultar en un bajo acoplamiento de potencia óptica entre la fuente de luz y la fibra óptica de entrada. En aplicaciones críticas de sensado remoto, donde la pérdida de potencia puede resultar inconveniente empleando una fuente de esta naturaleza, es preferible una fuente láser.

La elección del elemento fotodetector está ligada principalmente con la potencia óptica proveniente de la fibra óptica receptora y la longitud de onda de operación. Así, el fotodiodo a emplearse deberá tener sensibilidad en un ancho espectral alrededor de la longitud de onda de trabajo. Para aplicaciones en que la potencia óptica incidente no es suficiente para generar una fotocorriente capaz de ser amplificada por un circuito fotorreceptor, es conveniente entonces emplear un dispositivo con ganancia intrínseca como el fotodiodo de avalancha.

2.9 Conclusiones

El estudio del comportamiento del sensor refractométrico requiere hacer uso de las diferentes formas de tratar la radiación óptica. Así, se recurre a la óptica geométrica para conocer si un rayo será reflejado internamente en el elemento óptico así como la dirección de dicho rayo; la reflectancia, factor determinante de la intensidad de un rayo reflejado, se obtiene considerando la luz como onda electromagnética; y la óptica cuántica interviene en el proceso de transducción optoelectrónica en el circuito fotorreceptor.

Los elementos ópticos que puedan formar parte de un dispositivo sensor influyen considerablemente en la respuesta del mismo, por ello es fundamental conocer las características de fuentes de luz, fibras ópticas y fotodetectores con el fin de elegir dichos elementos de acuerdo al principio de operación del sensor y de la aplicación para la cual sea desarrollado. En el caso del sensor refractométrico en fibras ópticas las ventajas, desventajas y efectos en la respuesta del sensor de los elementos ópticos permitieron definir los dispositivos a emplear en la implementación de la instalación experimental, descrita en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Descripción de la Instalación Experimental

3.1 Introducción

En este capítulo se describe la instalación experimental del sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico. Las partes que la conforman involucra el subsistema mecánico, óptico y electrónico. De estos tres sistemas, en el presente trabajo se describe de manera general el subsistema mecánico y óptico, y se ahonda en el subsistema electrónico; específicamente, el circuito fotorreceptor.

3.2 Subsistema mecánico

Entre los parámetros descritos que se desea variar experimentalmente se encuentra la distancia relativa de las fibras ópticas. Para ello, es necesario tener un control preciso sobre la posición de las fibras ópticas, especialmente en lo que respecta a la distancia L que existe entre ellas y el centro de la semiesfera ocupada como elemento transductor.

La figura 3.1 muestra la configuración mecánica empleada. Una mesa óptica ThorLabs PBI51505 de trabajo soporta toda la estructura mecánica empleada. Dos bases con movimiento triaxial de precisión de $10\mu\text{m}$ ThorLabs PT3 sostienen los brazos metálicos que a su vez sostienen a las fibras ópticas. De esta manera, es posible controlar la distancia de las fibras ópticas al eje de la

semiesfera (eje X), ajustar la profundidad de las fibras a fin de que se encuentren en el mismo plano diametral (eje Y), y colocar las fibras a la altura adecuada (eje Z) de tal manera que las caras de las fibras se encuentren en el plano de la semiesfera y no exista una interfase de aire entre las fibras y el elemento óptico. Si bien es cierto que las bases tienen una escala graduada para medir el desplazamiento en cada uno de los ejes, se adicionaron elementos auxiliares para medir las distancias en el eje X en forma rápida. La precisión de estos instrumentos es de $10\mu\text{m}$. Su forma de operar es simple, ya que constan de un tubo que al experimentar un esfuerzo de compresión se desplaza de tal forma que un mecanismo interno hace girar una aguja de manera proporcional.

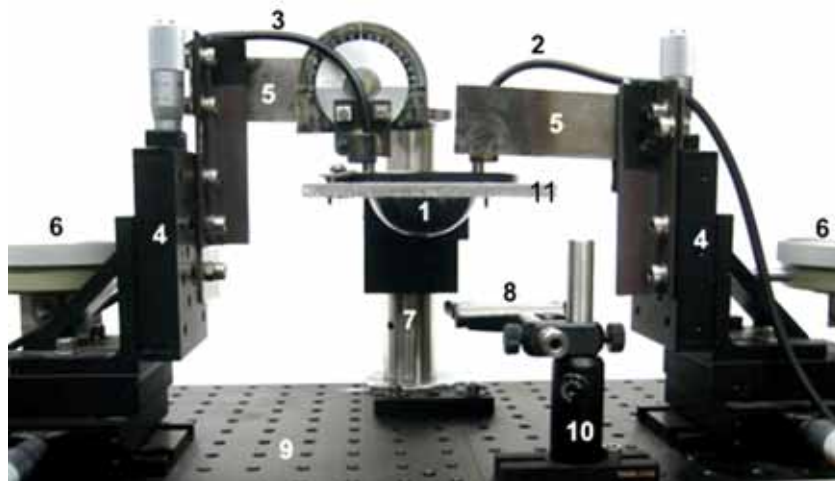


Figura 3.1. Foto del sistema mecánico de la instalación experimental donde: (1) - el elemento óptico, las fibras ópticas (2) - emisora y (3) - receptora, (4) - mesas de movimiento triaxial, (5) - brazos de sujeción de las fibras ópticas, (6) - medidores de desplazamiento, (7) - poste, (8) - plataforma para muestras, (9) - mesa de trabajo, (10) - soporte de plataforma de muestras, y (11) - plataforma del elemento óptico.

Como ya se mencionó anteriormente, las fibras ópticas se sujetan a las bases de movimiento triaxial mediante brazos metálicos de tal manera que, en un extremo, un anillo metálico sostiene a la fibra. El extremo de la fibra óptica se inserta en el anillo y es asegurada mediante un tornillo.

El elemento óptico descansa en una plataforma metálica al ser introducido en una perforación de la misma. Esta plataforma está colocada a una altura determinada y se sostiene a su vez mediante un poste. Así, la parte semiesférica queda por debajo de la plataforma y las muestras líquidas pueden ser colocadas de tal forma que el elemento quede completamente inmerso. Una plataforma auxiliar permite poner en contacto las muestras líquidas que se encuentren en un pequeño contenedor.

Mediante un soporte mecánico fijo, la fuente de radiación óptica es colocada en dirección normal a la cara de la fibra óptica de entrada, colocada a una distancia de 80 mm, tal que la radiación incidente corresponda al campo lejano de emisión de la fuente. De esta manera, si la fuente de luz emite frentes de onda que no sean planos, a grandes distancias la aproximación puede ser plana.

3.3 Subsistema óptico

3.3.1 Fotodetector

Como dispositivo detector de la intensidad de luz recibida en el extremo del sensor refractométrico se empleó un fotodiodo de Germanio cuya característica principal es la amplia superficie fotosensible de 23.5mm^2 , lo que nos beneficia al poder detectar la luz proveniente de fibras ópticas con apertura numérica grande. Sin embargo, las características de la responsividad del mismo no se tienen a la mano, de tal manera que cualitativamente se determinó la sensibilidad del mismo. Al no contarse con las especificaciones sobre la longitud de onda a la cual tiene mayor sensibilidad el fotodiodo, se probaron distintas longitudes de onda para conocer la respuesta empleando una misma señal de excitación. Las mediciones se resumen en la Tabla 3.1. El dispositivo presentó mayor sensibilidad el infrarrojo cercano que en el espectro visible. Por esta razón, se decidió trabajar en esta región del espectro óptico.

Tabla 3.1. Respuesta del fotodiodo para distintas longitudes de onda

	Blanco	Azul ($\lambda = 470\text{ nm}$)	Rojo ($\lambda = 635\text{ nm}$)	Infrarrojo ($\lambda = 940\text{ nm}$)
i_{entrada}	38.36mA	38.36mA	38.36mA	38.36mA
$V_{\text{señal}}$	25 mV	-	80 mV	650 mV
V_{ruido}	15 mV	15 mV	15 mV	15 mV
S/R	1.666	-	5.333	43.333

Las características eléctricas del fotodiodo fueron determinadas experimentalmente y su desarrollo se muestra más adelante, en el subsistema electrónico.

3.3.2 Fuente de luz

Como fuente de radiación óptica se eligió un diodo emisor de luz. El sensor se fundamenta en la detección de la intensidad modulada por el medio externo, de tal manera que las características y efectos de la radiación como la polarización y coherencia en el sensor aún no han sido tratados.

El LED es un compuesto de GaAlAs marca Everlight modelo IR333C/H0/L10 con un diámetro en su área emisora de 5 mm; la máxima emisión se encuentra en la longitud de onda $\lambda = 940\text{nm}$ y presenta un ancho espectral de 45nm. El patrón de radiación del LED tiene como característica un ángulo de divergencia amplio, esto es, $2\theta = 40^\circ$. Las características detalladas del LED se encuentran en la sección de hojas de especificaciones en el apéndice A.

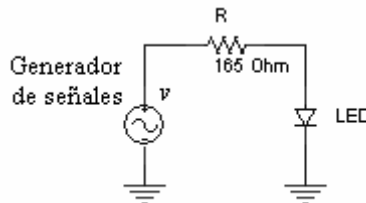


Figura 3.2. Circuito empleado para alimentar el diodo emisor de luz.

El circuito que alimenta al LED se muestra en la figura Figura 3.2. El oscilador que se emplea es un generador de señales marca Stanford Research Systems modelo DS345 el cual provee una señal de corriente alterna triangular cuya corriente pico es 13.3 mA a una frecuencia de 100Hz. El circuito empleado rectifica la señal triangular y la señal óptica tiene la forma que se muestra en el oscilograma de la figura 3.3.

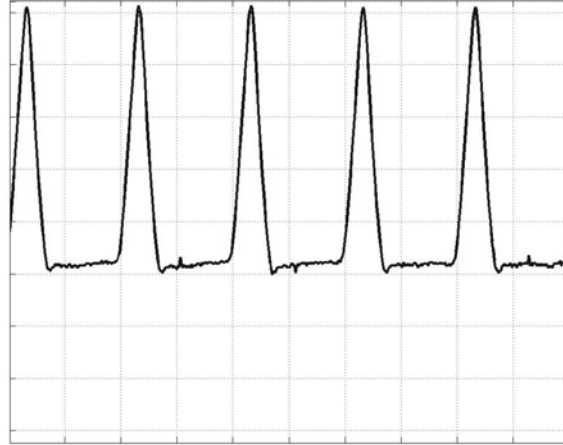


Figura 3.3. Señal triangular rectificada, empleada en el sensor. La escala horizontal es 5 ms/div mientras que la escala vertical es 2 V/div.

3.3.3 Elemento semiesférico de detección

El elemento semiesférico de detección idealmente debería ser sólido, con las fibras ópticas en contacto íntimo. Sin embargo, resulta complejo realizar un elemento óptico de tamaño considerablemente grande. Por facilidad de fabricación para el modelo físico del sensor se empleó una semiesfera hueca de paredes delgadas de vidrio de borosilicato cuyo índice de refracción es $n=1.47$ medido a una longitud de onda $\lambda = 633$ nm. El tiene radio externo R de la esfera es de 30 mm y el espesor de las paredes es de 1.2 mm; cuenta con un anillo de acrílico adherido para poder suspenderla en la plataforma. Con el fin de emular una semiesfera sólida, la semiesfera hueca se llena con un fluido cuyo índice sea lo más aproximado al índice de refracción de la semiesfera; para ello, se empleó glicerina. Finalmente las fibras ópticas son colocadas sobre la estructura semiesférica en contacto directo con la glicerina.

3.3.4 Fibras ópticas

Debido al tamaño del modelo físico del elemento óptico de detección, las fibras ópticas que se emplearon son en realidad dos conjuntos de fibras ópticas. Si se empleasen fibras ópticas convencionales multimodo (62.5/125 μ m) se tendría un diámetro relativo de las fibra de $\Phi=0.002$, el cual es muy pequeño, y si se desea proyectar un sensor que pueda ser desarrollado como estructura micro óptica, este valor orillaría a complicaciones de fabricación.

Cada haz de fibras esta compuesto de fibras ópticas monomodo de índice escalonado, de tal manera que, en los extremos de dicho haz una, máscara circular limita la apertura lineal. Las

particularidades de las fibras muestran imperfecciones que dificultan proporcionar con precisión los valores de apertura lineal. Para la fibra emisora se observó que la máscara prácticamente es redonda, pero la mayor parte de la luz emerge de una sección solamente. Para la fibra receptora, se observó que la máscara es elipsoidal, y que la luz emerge de todo el conjunto de fibras. El valor promedio que se consideró es de $D=1.5\text{mm}$, de tal manera que el diámetro relativo es $\Phi=0.04$.

La caracterización de las fibras ópticas llevó también a obtener la apertura numérica. Las mediciones realizadas para la entrada y salida arrojan los patrones mostrados en la figura 3.4 y 3.5, respectivamente.

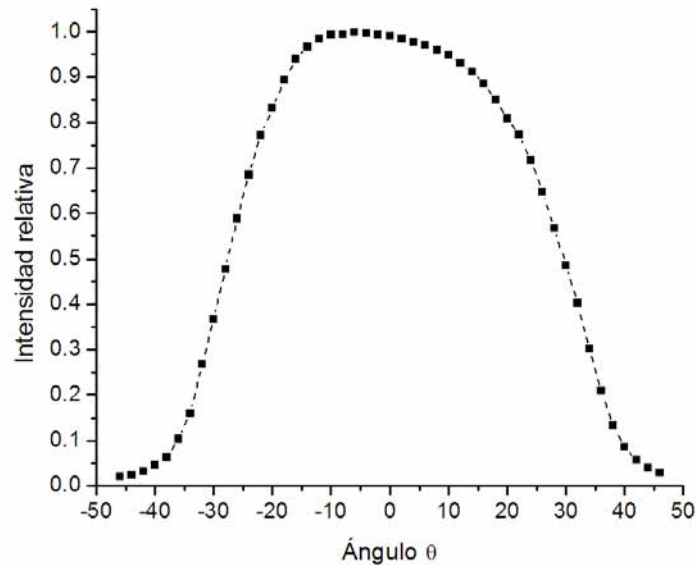


Figura 3.4. Patrón de entrada de la fibra óptica. La escala vertical muestra la intensidad relativa a la intensidad máxima.

Como se puede apreciar, el patrón de salida no presenta la respuesta típica de una fibra de índice escalonado. La apertura angular y numérica entonces se define bajo 2 criterios subjetivos: el primero considerando el valor para el cual la potencia cae 50% (apertura efectiva) el cual es $\theta_{50\%} = 29^\circ$ equivalente a una apertura numérica de $AN = 0.485$ y el segundo tomando el valor para el cual la potencia cae al 5% (apertura máxima) correspondiente a $\theta_{5\%} = 41^\circ$ y una apertura numérica $AN = 0.656$. Los valores promedio obtenidos se muestran en la tabla 3.2.

El patrón de salida permite observar que el haz con el que se emite en la fibra óptica es menor que la apertura numérica. El ángulo promedio en el que la potencia cae al 50% en el patrón de salida es $\theta_{50\%} = 5.5^\circ$ y al 5% es $\theta_{5\%} = 15^\circ$.

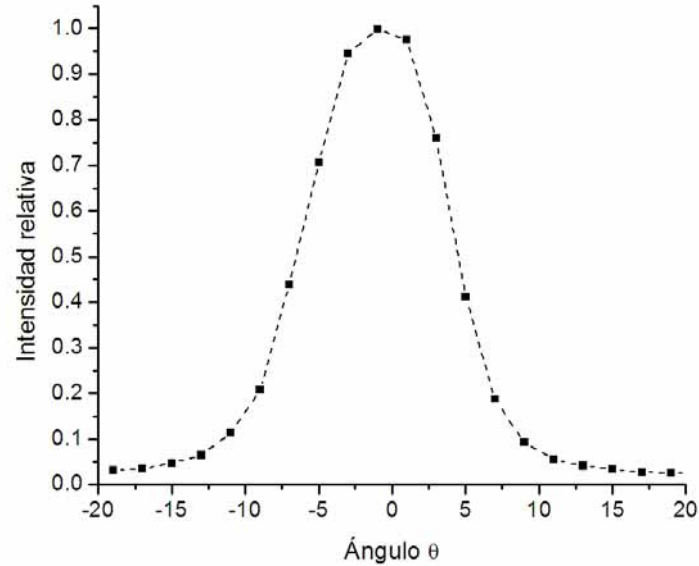


Figura 3.5. Patrón de salida de la fibra óptica excitada por el LED.

3.4 Subsistema eléctrico

Como se mencionó con anterioridad, el fotodiodo puede ser empleado bajo la configuración fotovoltaica o fotoconductiva. La configuración fotovoltaica tiene un rango estrecho de linealidad, poco conveniente para nuestra aplicación.

La configuración del fotodiodo en modo fotoconductivo implica tener como variable auxiliar a la corriente eléctrica, produciéndose ésta de manera proporcional a la potencia óptica incidente; dicha corriente debe ser convertida a voltaje para poder ser medida y este procedimiento mejora el desempeño general del circuito.

La forma más simple de operar el fotodiodo en modo fotoconductivo es aplicarle una polarización inversa. La caída de tensión que podemos detectar dependerá entonces del valor de la resistencia de carga.

A fin de determinar el circuito más adecuado a las necesidades del sistema, y a partir de los estudios teóricos que muestran el comportamiento del sensor refractométrico, las pruebas realizadas corresponden a la configuración del dispositivo donde existe transmisión máxima de radiación óptica. La posición relativa elegida de las fibras ópticas para dichas pruebas fue $A=0.707$.

Con el circuito mas simple no se obtuvo una señal de salida y el voltaje pico a pico de ruido medido fue de 9 mV. Dado que el parámetro que podemos manipular de esta configuración es la magnitud de la resistencia, se varió la misma tomando los valores de $3.3M\Omega$, $20M\Omega$ y $30M\Omega$ sin conseguir exitosamente recuperar nuestra señal óptica, prevaleciendo únicamente el ruido mencionado anteriormente, por lo que esta configuración no favorece nuestra aplicación.

El circuito que se consideró como siguiente opción para realizar esta conversión es un amplificador de transimpedancia basado en amplificadores operacionales. Este circuito amplificador, al no aplicar un voltaje de polarización al fotodiodo y al presentar una alta impedancia (la impedancia de entrada del amplificador operacional) como carga al fotodiodo, tiene menos influencia de la corriente de oscuridad y proporciona un mayor rango lineal en el que la fotocorriente es proporcional a la potencia de luz incidente [14]. El diseño de un amplificador de transimpedancia para un fotodetector implica un compromiso entre los parámetros tales como ganancia, ancho de banda, estabilidad, ruido, nivel de desplazamiento de corriente directa y respuesta temporal.

La configuración básica del amplificador de transimpedancia con la que se iniciaron las pruebas es la siguiente:

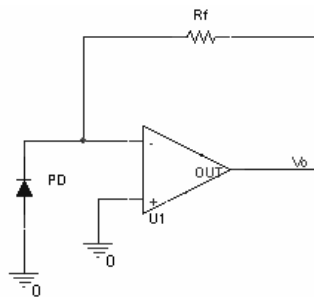


Figura 3.6. Configuración básica del amplificador de transimpedancia

La función de voltaje de este circuito puede ser obtenida tomando en cuenta las características ideales del amplificador operacional, resultando $v_o = R_f i_{ph}$.

Dado que el voltaje de salida depende de la resistencia de realimentación, dicha resistencia debe ser de valor alto, ya que la fotocorriente es muy pequeña para tener un voltaje que pueda ser detectado.

La implementación del circuito se realizó empleando una resistencia de realimentación de $3.3M\Omega$, sin embargo, no fue posible obtener una señal de salida. Para aumentar la ganancia sin contribución de ruido se adicionó una resistencia del mismo valor que la resistencia de realimentación en la entrada inversora del amplificador, de tal manera que la salida de voltaje es proporcional a la suma de las resistencias por la fotocorriente. Pese al aumento de ganancia no se consiguió obtener una señal de salida.

3.4.1.1 Amplificador de transimpedancia de alta ganancia

Dado que con ninguno de los circuitos empleados se había logrado recuperar la señal óptica, se optó por emplear una configuración de amplificador de transimpedancia de alta ganancia propuesto por [14]. Este circuito es una configuración híbrida que conjunta los beneficios del amplificador de transimpedancia y una configuración de amplificador no inversor. El circuito a emplear es el siguiente:

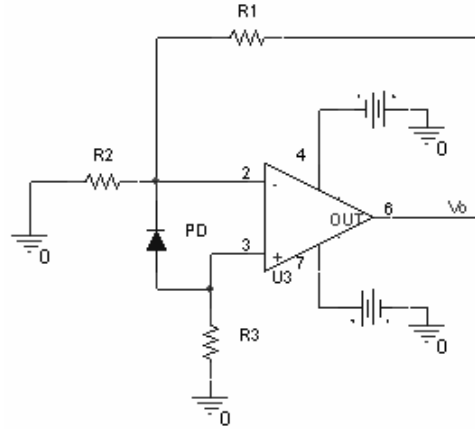


Figura 3.7. Configuración híbrida del circuito fotorreceptor.

Una primera aproximación de la función de transferencia del voltaje de salida respecto a la fotocorriente se deduce a continuación. Para ello, se considera el modelo ideal del fotodiodo como una fuente de corriente y el modelo ideal del amplificador operacional.

De la suma de corrientes en el nodo en la entrada inversora:

$$i_{Rf} = i_{R1} + i_p \quad (3.1)$$

Pero:

$$i_{Rf} = \frac{v_s - v_n}{R_f} \quad (3.2)$$

$$i_{R1} = \frac{v_n}{R_1} \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.2) y (3.3) en (3.1):

$$\frac{v_s - v_n}{R_f} = \frac{v_n}{R_1} + i_p \quad (3.4)$$

Del amplificador operacional:

$$v_s = A_V (v_p - v_n)$$

Se despeja:

$$v_n = v_p - \frac{v_s}{A_V} \quad (3.5)$$

Además:

$$v_p = R_p i_p \quad (3.6)$$

Sustituyendo (3.5) y (3.6) en (3.4) y agrupando:

$$v_s \left[\frac{1}{R_f} + \frac{1}{A_v} \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) \right] = R_p \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) i_p + i_p \quad (3.7)$$

Bajo la suposición de la ganancia infinita del amplificador operacional ideal:

$$\frac{v_s}{R_f} = R_p \left(\frac{R_f + R_1}{R_f R_1} + 1 \right) i_p \quad (3.8)$$

Y finalmente la función de transferencia de primera aproximación es:

$$\frac{v_s}{i_p} = R_p \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) + R_f \quad (3.9)$$

La ecuación 3.9 es una función de transferencia aplicable únicamente en baja frecuencia y que resulta útil para establecer un criterio de diseño. A partir de ello, se buscan los elementos para tener una ganancia que permita tener una señal de salida que pueda ser detectada. Se realizaron diversas pruebas variando el valor de las resistencias. El circuito cuya ganancia y rango dinámico útil para nuestra aplicación se muestra en la figura 3.8.

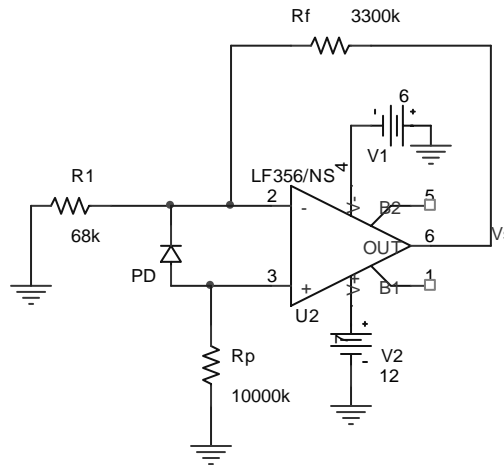


Figura 3.8. Circuito fotorreceptor propuesto.

La elección del amplificador operacional en circuito integrado se basó en las características principales que requiere la aplicación. Entre los parámetros que éste debe satisfacer son: alta ganancia, bajo ruido, impedancia de entrada alta, razón de rechazo al modo común alto, y niveles bajos de corriente en las entradas del amplificador. El amplificador elegido fue el LF356N de National Semiconductor. Las hojas de especificaciones del circuito integrado se encuentran en el apéndice A.

Al realizar las medidas para obtener la respuesta en frecuencia del circuito implementado, se encontró que presenta una respuesta con un pico de ganancia, como se observa en la figura 3.9. Este punto de ganancia máxima se encuentra en la frecuencia $f = 1.60[kHz]$.

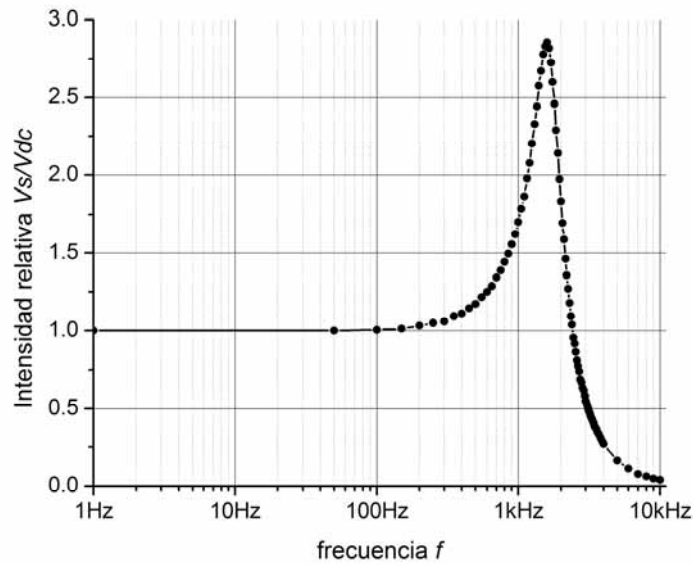


Figura 3.9. Intensidad óptica relativa a la intensidad óptica en DC contra frecuencia del circuito fotorreceptor propuesto.

Para indagar más a fondo sobre la respuesta del circuito obtenida, 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 3.10.

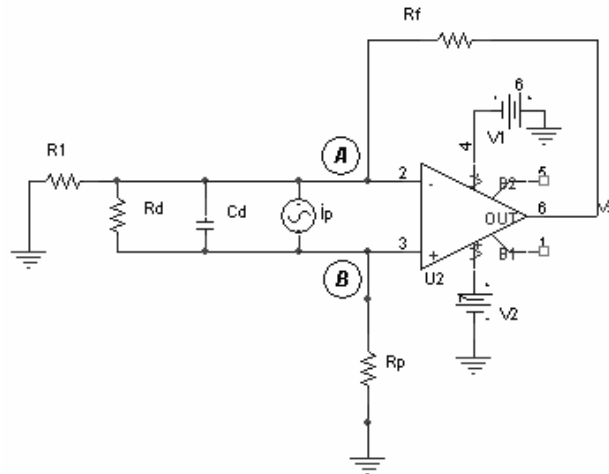


Figura 3.10. Circuito equivalente del circuito fotorreceptor.

3.4.1.2 Análisis en frecuencia para el circuito fotorreceptor

En el nodo (A):

$$i_{Rf} = i_{R1} + i_{rd} + i_{cd} + i_{ph} \quad (3.10)$$

En el nodo (B):

$$i_{Rp} = i_{rd} + i_{cd} + i_{ph} \quad (3.11)$$

Pero:

$$i_{Rp} = \frac{v_p}{R_p} \quad (3.12)$$

$$i_{Rf} = \frac{v_s - v_n}{Rf} \quad (3.13)$$

$$i_{R1} = \frac{v_n}{R_1} \quad (3.14)$$

$$i_{rd} = \frac{v_n - v_p}{r_d} \quad (3.15)$$

$$i_{cd} = \frac{v_n - v_p}{Z_{cd}} = \frac{v_n - v_p}{\frac{1}{sC_d}} = sC_d(v_n - v_p) \quad (3.16)$$

Del amplificador operacional:

$$v_s = a_v(v_p - v_n) \Rightarrow v_p = \frac{v_s}{a_v} + v_n \quad (3.17)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.13 a 3.16 en la ecuación 3.10:

$$\frac{v_s - v_n}{R_f} = \frac{v_n}{R_1} + \frac{v_n - v_p}{r_d} + sC_d(v_n - v_p) + i_{ph} \quad (3.18)$$

Reduciendo términos semejantes y agrupando la ecuación 3.18:

$$v_s \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{a_v r_d} + \frac{1}{a_v} \right) = v_n \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) + i_{ph} \quad (3.19)$$

Por otra parte, sustituyendo las ecuaciones 3.12, 3.15 y 3.16 en la ecuación 3.11:

$$\frac{v_p}{R_p} = \frac{v_n - v_p}{r_d} + sC_d(v_n - v_p) + i_{ph} \quad (3.20)$$

Reagrupando:

$$v_p \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{r_d} + sC_d \right) = v_n \left(\frac{1}{r_d} + sC_d \right) + i_{ph} \quad (3.21)$$

Sustituyendo (3.17) en (3.21):

$$\left(\frac{v_s}{a_v} + v_n \right) \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{r_d} + sC_d \right) = v_n \left(\frac{1}{r_d} + sC_d \right) + i_{ph} \quad (3.22)$$

Reduciendo términos semejantes y despejando v_n :

$$v_n = R_p \left[i_{ph} - \frac{v_s}{a_v} \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{r_d} + sC_d \right) \right] \quad (3.23)$$

Sustituyendo la expresión 3.20 en la ecuación 3.22 y despejando $\frac{v_s}{i_{ph}}$ se tiene:

$$\frac{v_s}{i_{ph}} = \frac{\left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) R_p + 1}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{a_v} \left[\frac{1}{r_d} + sC_d \left(\left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) R_p + 1 \right) + \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_p}{r_d} \right) \right]} \quad (3.24)$$

Dividiendo la ecuación 3.24 entre $\frac{1}{R_f}$ se tiene:

$$\frac{v_s}{i_{ph}} = \frac{\left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) R_p + R_f}{1 + \frac{1}{a_v} \left[sC_d \left(\left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) R_p + R_f \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_p}{r_d} \right) + \frac{R_f}{r_d} \right]} \quad (3.25)$$

La respuesta típica en frecuencia del amplificador operacional en lazo abierto tiene una respuesta como la que se muestra en la figura 3.11, y esta puede ser aproximada por medio de una función de filtro paso bajas de primer orden, tal que:

$$a_v = A_{m\acute{a}x} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (3.26)$$

Donde $A_{m\acute{a}x}$ es la Ganancia máxima, es decir, la ganancia en corriente directa; y ω_c es la frecuencia del corte para la respuesta tal como se muestra en la figura, de tal manera que:

$$\omega_t = A_{m\acute{a}x} \omega_c \Rightarrow \omega_c = \frac{\omega_t}{A_{m\acute{a}x}} \quad (3.27)$$

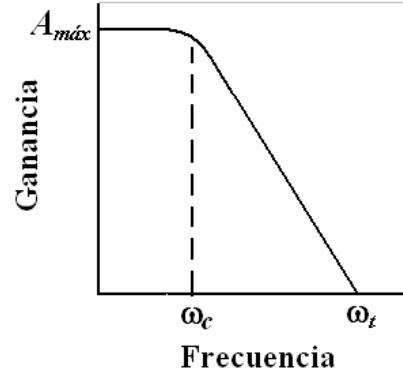


Figura 3.11. Respuesta típica en frecuencia de un amplificador operacional en lazo abierto

A fin de mostrar la naturaleza del sistema que se obtiene, se realizan las siguientes sustituciones

$$R_{eq1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) R_p + R_f \quad (3.28)$$

$$k = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_p}{r_d}\right) + \frac{R_f}{r_d} \quad (3.29)$$

en la función de transferencia 3.25, obteniéndose:

$$\frac{v_s}{i_{ph}} = \frac{R_{eq1}}{1 + \frac{1}{a_v} [sC_d (R_{eq1}) + k]} \quad (3.30)$$

y sustituyendo la aproximación de la respuesta del amplificador operacional (ecuación 3.26) en la ecuación 3.30:

$$\frac{v_s}{i_{ph}} = \frac{\frac{A_{máx} \omega_c}{C_d}}{s^2 + \left(\omega_c + \frac{k}{C_d R_{eq1}}\right) s + \left(\frac{k + A_{máx}}{C_d R_{eq1}}\right) \omega_c} \quad (3.31)$$

Como se puede observar, la función de transferencia resulta en términos de valores conocidos tales como la resistencia R_{eq1} , dependiente de los valores dispuestos en la primera aproximación, la ganancia máxima y frecuencia de corte del amplificador operacional; pero también depende de la resistencia r_d y capacitancia C_d del fotodiodo [14]. Estos parámetros del fotodiodo no son conocidos, pero pueden ser determinados considerando el sistema de segundo orden que representa la función de transferencia, igualándose a la función de la forma:

$$H(s) = \frac{K_0}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.32)$$

De la respuesta en frecuencia del circuito se puede determinar el valor del factor de amortiguamiento ζ y la frecuencia natural ω_n . La magnitud de la función es:

$$|H(j\omega)| = \frac{\frac{K_0}{\omega_n^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (3.33)$$

La frecuencia donde se presenta el valor máximo es la frecuencia de resonancia ω_m , y despejando el factor de amortiguamiento:

$$\zeta = \frac{\frac{K_0}{\omega_m^2}}{2|H(j\omega_m)|} \quad (3.34)$$

Pero como la respuesta en frecuencia obtenida esta referida al valor en dc, es decir, cuando la frecuencia es $\omega_n=0$, entonces:

$$\zeta = \frac{1}{2|H(j\omega_m)|} \quad (3.35)$$

De la figura 3.9, se tiene el valor máximo $|H(j\omega_n)| = 2.85$ en $f_n = 1.60[kHz]$, entonces el factor que se obtiene por la ecuación 3.35 es $\zeta = 0.175$.

Igualando la función de transferencia 3.31 del circuito con la forma general de sistemas de segundo orden 3.32 se obtiene que:

$$\omega_n^2 = \frac{k + A_{m\acute{a}x}}{C_d R_{eq1}} \quad (3.36)$$

$$2\zeta\omega_n = \omega_c + \frac{k}{C_d R_{eq1}} \quad (3.37)$$

De las ecuaciones 3.36 y 3.37 se despeja k y se igualan, tal que despejando la capacitancia del fotodiodo se tiene:

$$C_d = \frac{A_{m\acute{a}x}}{R_{eq1} \left(\frac{\omega_n^2}{\omega_c} + \omega_c - 2\zeta\omega_n \right)} \quad (3.38)$$

La ganancia del amplificador operacional LF356 es:

$$A_{m\acute{a}x} = 10^{\frac{A_{m\acute{a}x}dB}{20}} = 10^{\frac{106dB}{20}} = 199.53 \times 10^3$$

y la frecuencia del corte empleando la frecuencia de transición del circuito LF356, a partir de la ecuación 3.27 resulta:

$$f_c = \frac{f_t}{A_{m\acute{a}x}} = \frac{5 \times 10^6 \text{ Hz}}{199.53 \times 10^3} = 25.06 \text{ Hz}$$

Considerando dichos valores se obtiene

$$C_d = 659.4 [\text{pF}]$$

Conociendo el capacitor es posible conocer k , y con ello la resistencia dinámica, tal que se despeja r_d :

$$r_d = \frac{1}{k - \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)} R_{eq1} = 476.6 [\text{k}\Omega]$$

La respuesta en frecuencia de este circuito presenta un máximo de ganancia el cual resulta indeseable, ya que ruido en esas frecuencias será amplificado aún más que la señal, y los armónicos de la señal que empleamos pueden ser igualmente amplificados, provocando distorsión de la señal. Estos efectos no deseados pueden ser eliminados adicionando un elemento sensible a la frecuencia.

Un elemento capacitivo en paralelo a la resistencia R_p produce variaciones la función de transferencia del circuito de tal manera que se pueda controlar el comportamiento del sistema a fin de eliminar el pico de ganancia [14].

El análisis para la obtención de la función de transferencia del circuito procede de manera análoga al circuito previamente mostrado, solamente que en este caso se sustituye la resistencia R_p por la impedancia que conforman la resistencia R_p y el capacitor C_p en paralelo, tal que:

$$Z_p = R_p // Z_{C_p} = \frac{R_p \frac{1}{C_p s}}{R_p + \frac{1}{C_p s}} = \frac{R_p}{R_p C_p s + 1} \quad (3.39)$$

Al realizar la sustitución de la impedancia Z_p en la función de transferencia, se tiene:

$$\frac{v_s}{i_{ph}} = \frac{\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_p}{R_p C_p s + 1} + R_f}{1 + \frac{1}{A_{m\acute{a}x} \frac{\omega_c}{s + \omega_c}} \left[s C_d \left(\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_p}{R_p C_p s + 1} + R_f \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{1}{R_p C_p s + 1} + \frac{1}{r_d} \right) + \frac{R_f}{r_d} \right]}$$

Esta función de transferencia presenta tres polos y un cero. La expansión en fracciones parciales permite realizar una separación del sistema en la suma de una función de primer orden con una función de segundo orden, tal que ésta última sea de la forma general de los sistemas de segundo orden (ecuación 3.32); esto es, una estructura de un sistema de segundo orden análogo al sistema sin el capacitor C_p pero con la ventaja de poder manipular el factor de amortiguamiento ζ ya que éste resulta dependiente del capacitor C_p .

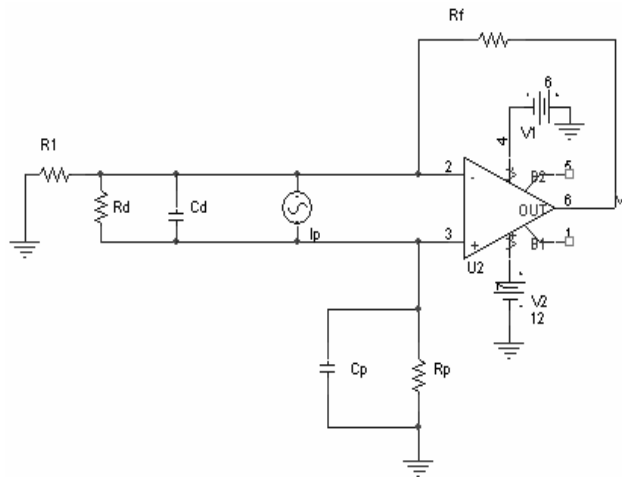


Figura 3.12. Circuito fotorreceptor con capacitor C_p .

Existe un compromiso entre el valor del factor de amortiguamiento tal que se elimine el pico en ganancia que presenta el circuito sin capacitor, y el ancho de banda del circuito. Para establecer el valor mínimo de C_p , se debe determinar el valor del capacitor con el cual el factor de amortiguamiento es $\zeta = 0.707$. De sistemas de segundo orden se sabe que en dicho valor la respuesta en frecuencia resulta plana [15], como se muestra en la figura 3.13.

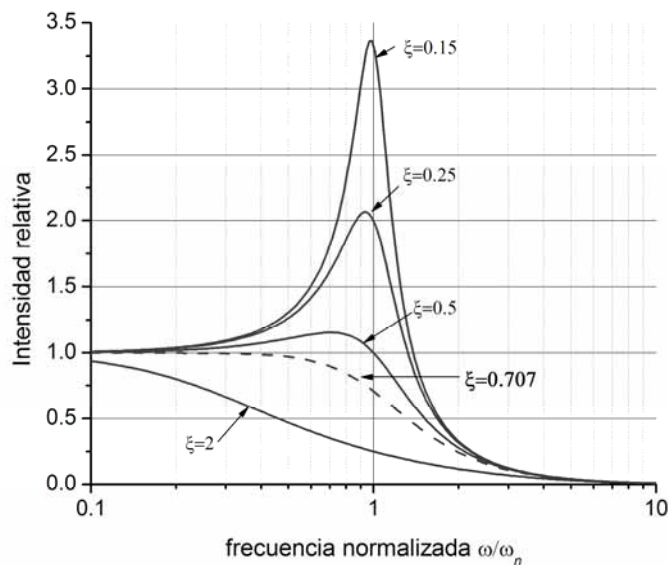


Figura 3.13. Respuesta en frecuencia para sistemas de segundo orden para distintos valores de ζ .

Como se mencionó anteriormente, la función de transferencia del circuito debiera ser expandida en fracciones parciales para obtener así la contribución del capacitor en el sistema de segundo orden. Sin embargo, realizar la expansión en forma analítica implicaría conocer las raíces del polinomio de tercer orden del denominador para posteriormente poder obtener la expansión en fracciones parciales. Por la estructura de la función de transferencia, los términos correspondientes a los coeficientes de las ecuaciones para obtener las raíces son extensos y dependientes de C_p y eventualmente se requiere resolver las ecuaciones por metodología numérica. Otra forma de resolver el problema es mediante la resolución numérica directamente sobre la función de transferencia de tercer orden.

Se programó la función de transferencia en Matlab y se realizó un proceso iterativo en el cual se varía el valor del capacitor C_p , se calcula la función de transferencia del circuito, se realiza la expansión en fracciones parciales, se obtiene el coeficiente $2\zeta\omega_n$ y se despeja el factor de amortiguamiento, hasta encontrar el valor que satisface el requerimiento de diseño de $\zeta = 0.707$.

El valor obtenido mediante este procedimiento indica que el capacitor de menor valor que puede ser empleado es:

$$C_p = 10.98[\text{pF}]$$

La respuesta en frecuencia del circuito obtenida teóricamente y simulada en el programa PSpice se muestra en la figura 3.14, donde se muestra la función de transferencia con y sin el capacitor de compensación.

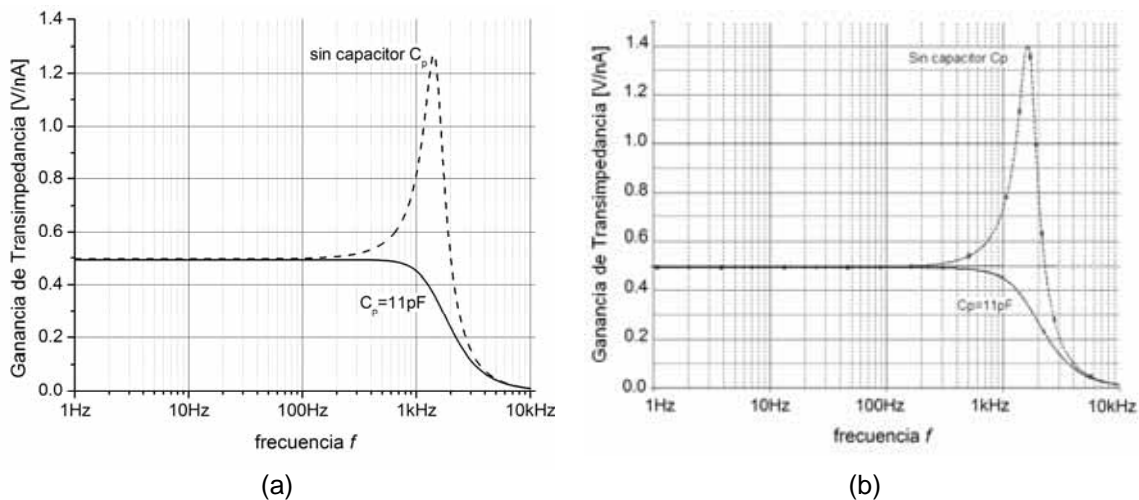


Figura 3.14. Respuesta en frecuencia de la función de transferencia del circuito fotorreceptor (a) obtenida teóricamente (b) simulando el circuito en PSpice

Con base en este valor obtenido, se emplearon 2 capacitores comerciales de 5.6pF conectados en paralelo para así conformar un capacitor de 11.2pF.

Finalmente, se midió la respuesta en frecuencia del circuito implementado, empleando un

capacitor de 5.6pF y el capacitor de 11.2pF a fin de verificar las consideraciones teóricas del circuito. La figura 3.15 muestra como la respuesta en frecuencia del circuito cuando tiene un capacitor en paralelo con la resistencia R_p de valor menor al obtenido teóricamente, presenta aún un pico de ganancia. Empleando el capacitor $C_p = 11.2\text{pF}$, se puede observar que la respuesta en frecuencia ya no presenta sobrepaso.

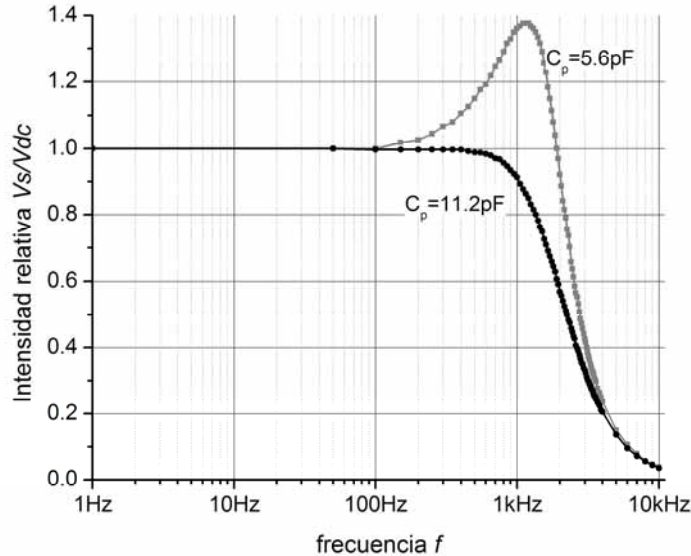


Figura 3.15. Respuesta en frecuencia del circuito con capacitor de 5.6pF y de 11.2 pF. Un valor menor a 11pF no elimina el pico de ganancia.

Comparando los valores obtenidos para la frecuencia de corte del circuito directamente medidos, simulados y obtenidos de la función de transferencia se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comparación de la frecuencia de corte obtenida teórica, medida y simulada.

	<i>Teórica</i>	<i>Simulación</i>	<i>Medida</i>
<i>Frecuencia de corte</i>	2.048 kHz	2.20 kHz	2.250 kHz

Cabe mencionar que al implementar el circuito diseñado, se presentaba interferencia electrostática y magnética, así como una señal de 60 Hz. La reducción de la interferencia se consiguió proporcionando al circuito un blindaje colocando el circuito en una caja metálica conectada a tierra física. La señal de 60 Hz tenía origen en las fuentes de polarización del amplificador operacional aun cuando la derivación de dichas fuentes era adecuada. Dado que la filtración de la misma no permitió mejorar el comportamiento del dispositivo, se optó por polarizar el circuito integrado mediante baterías alcalinas. La polarización del circuito integrado se realizó con +12Vdc y -6Vdc.

El nivel de ruido del circuito fotorreceptor oscila en voltajes pico a pico de 6 a 10 mV. Con la polarización del circuito integrado antes mencionada y teniendo en cuenta una señal a ruido $S/N=2$, el rango dinámico que presenta el circuito es de 550.

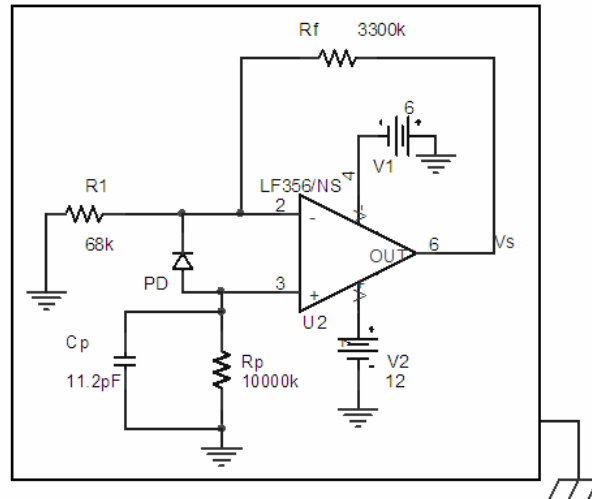


Figura 3.16. Circuito fotorreceptor final implementado en el sensor refractométrico.

3.5 Repetibilidad de la respuesta del sensor

Uno de las características fundamentales de la instalación experimental es la capacidad de reproducir los resultados de un experimento en tiempos diferidos, y obtener una respuesta similar (idealmente obtener los mismos resultados) para cada una de las ocasiones en que este sea repetido. En la metodología científica esta cualidad se denomina repetibilidad.

En el caso de la instalación experimental descrita con anterioridad, se realizaron pruebas de repetibilidad (no desarrolladas en el presente trabajo) que arrojan resultados importantes en cuanto a las condiciones del sensor y la metodología adecuada para reducir el margen de error en las mediciones. La repetibilidad del modelo físico es afectada principalmente por errores sistemáticos realizados en el proceso de la metodología experimental para la realización de mediciones.

Para el correcto funcionamiento del sensor refractométrico es necesario que el elemento óptico semiesférico se encuentre limpio, ya que residuos en la superficie del mismo afectan directamente a la transmisión.

Los resultados de otras pruebas sugieren que la posibilidad de pequeñas variaciones en el sistema mecánico de traslación de las fibras puede propiciar 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. Esta variación se puede reducir a un valor máximo de 0.51%, como se aprecia en la tabla 3.3, si se sigue la metodología que propone variar la distancia relativa de las fibras ópticas una vez que se concluyen las mediciones para todos los fluidos necesarios en una posición dada.

Tabla 3.3. Transmisión relativa promedio y desviación estándar de mediciones de $\Lambda=0.9067$ a $\Lambda=0.9067$.

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

Finalmente, en los resultados de pruebas realizadas se recomienda trabajar con valores promedio de cierto número de lecturas. Es conveniente que dicha medición provenga del promedio de una serie de lecturas tomadas a intervalos de tiempo, a fin de incrementar la relación señal a ruido de la señal medida y disminuir efectos de variaciones aleatorias.

3.6 Calibración y caracterización del sensor en el aire

Una vez dispuesta la instalación experimental, es necesario conocer el comportamiento del sensor a fin de comprobar la calibración del dispositivo. Para llevar a cabo este procedimiento se requiere tener un parámetro con el cual comparar la respuesta del sensor. A través del comportamiento del sensor en su transmisión absoluta dependiente de la posición relativa de las fibras ópticas cuando el medio externo al elemento óptico es aire, se puede realizar esta calibración. A partir de las simulaciones numéricas basadas en la teoría de la transmisión de la luz dentro del elemento óptico, se puede conocer la respuesta del sensor para dicho caso. Así, de antemano se sabe que presenta un comportamiento oscilatorio con puntos máximos de transmisión para determinadas posiciones de las fibras ópticas, correspondientes al acoplamiento de las mismas.

La metodología empleada para la caracterización en el aire consistió en realizar un barrido de posiciones de las fibras a partir de $\Lambda=0.69$ y hasta $\Lambda=0.99$. La cota inferior del rango de valores a considerar se eligió a partir del conocimiento teórico previo del sensor. En distancias menores a dicho límite, no existen condiciones para que se presente la reflexión total interna en la frontera del elemento óptico. Alrededor de $\Lambda=0.69$ comienza a presentarse acoplamiento de las fibras. Para valores tales que $\Lambda>0.69$, se comienzan a presentar condiciones de acoplamiento y el comportamiento oscilatorio mencionado anteriormente.

La tabla 3.4 muestra las posiciones relativas de las fibras ópticas óptimas, es decir, las posiciones para máximo acoplamiento. Cuando la posición de las fibras ópticas se aproxima a la frontera del elemento, se tiene la mayor transmisión posible debido a que casi toda la luz viaja a través del elemento óptico hasta la fibra óptica de salida con un gran número de reflexiones internas, Cuando las fibras ópticas alcanzan la frontera del elemento óptico, parte del diámetro de las fibras ópticas queda en la interfase del elemento, disminuyendo así la intensidad de luz emitida dentro

del elemento por la fibra óptica de entrada y a su vez se reduce el área de fibra óptica dentro del elemento capaz de recibir la luz. De acuerdo al grosor del elemento óptico, la distancia relativa a la cual ocurre este desbordamiento es en $\Lambda=0.946$.

Siguiendo las recomendaciones de las pruebas de repetibilidad, se realizaron 4 barridos entre los límites mencionados anteriormente a fin de establecer estadísticamente los valores de los máximos reduciendo errores posibles (mecánicos, de paralaje, etc). Teniendo estas mediciones se obtuvo la media para cada posición y éste es el valor empleado para realizar la comparación con los valores teóricos. La transmisión absoluta promedio T del sensor, obtenida experimentalmente expresada en términos de voltaje de salida del receptor óptico como una función de la posición de las fibras ópticas Λ , se muestra en la figura 3.17.

Los valores máximos obtenidos experimentalmente se muestran comparados con las predicciones teóricas de [1] en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. 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.

<i>Modo de transmisión M</i>	<i>Posición óptima teórica de las fibras ópticas</i>	<i>Posición óptima experimental de las fibras ópticas</i>
2	0.707	0.716
3	0.866	0.870
4	0.924	0.923
5	0.951	0.953

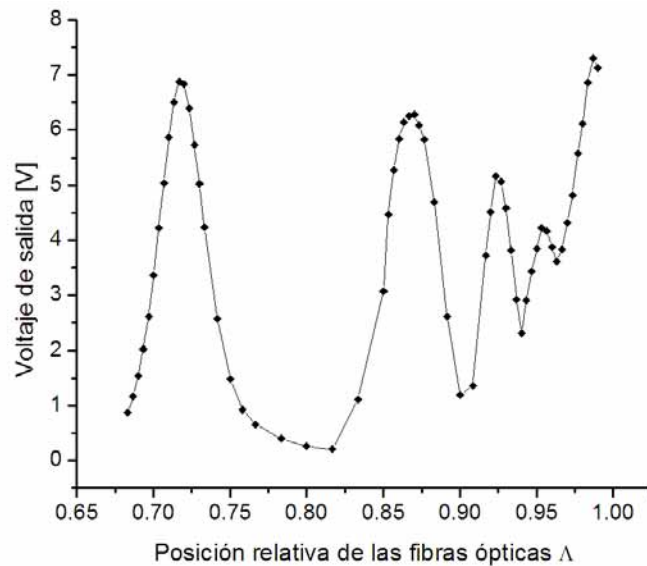


Figura 3.17: transmisión del sensor en el aire contra la posición de las fibras ópticas Λ . La transmisión está expresada en términos de voltaje de salida de foto receptor.

3.7 Conclusiones

La instalación experimental presentada ofrece diversas ventajas al tratarse de un modelo físico de gran escala. En el sistema mecánico, se aprovechan instrumentos de óptica de volumen y las partes que requirieron ser diseñadas a la medida se implementaron directamente en el laboratorio.

En cuanto al sistema óptico, el elemento semiesférico constituye la parte fundamental ya que el radio del mismo determina los parámetros adimensionales que definen al transductor.

El desarrollo del circuito fotorreceptor requirió de un proceso de experimentación con diferentes configuraciones. Si bien es cierto que el fotodiodo presenta un área sensible grande, la desventaja que se tenía era la carencia de especificaciones de la responsividad del mismo. De igual forma, se desconocían los parámetros electrónicos como la capacitancia y la resistencia dinámica. Sin embargo, a partir de la experimentación se lograron determinar las características eléctricas del fotodiodo, se consiguió desarrollar un diseño de circuito fotorreceptor que proporcionara la conversión de fotocorriente a voltaje y además constituyera un amplificador de alta ganancia. Como puede observarse, el circuito implementado únicamente utiliza un circuito integrado, adicionando a las ventajas mencionadas su bajo costo.

La caracterización del sensor cuando el medio externo es aire permite comparar el comportamiento del sensor con los resultados teóricos. Los valores obtenidos experimentalmente coinciden bien con las predicciones teóricas de [1]. La pequeña discrepancia del orden de 1% se observa únicamente en la posición del 1^{er} pico de acoplamiento a 0.7. La más probable explicación de esta discrepancia es que las características reales de las fibras ópticas utilizadas en el experimento no coinciden con las características ideales utilizadas en el trabajo teórico de [1].

Finalmente se definió la metodología más adecuada a fin de obtener dispersiones reducidas de las medidas, principalmente para llevar a cabo las mediciones cuando es necesario variar las muestras de líquidos y la posición relativa de las fibras, destacándose la importancia de las alteraciones que pueden producir los residuos en la superficie externa del elemento óptico.

Capítulo 4

Efectos de la absorción en el sensor refractométrico

4.1 Introducción

Cuando un haz de luz se hace pasar a través de materia en estado sólido, líquido o gaseoso su propagación es afectada en su intensidad, ya que la intensidad siempre decrecerá en mayor o menor medida conforme la luz penetra en el medio. La pérdida de intensidad es principalmente debida a la absorción, aunque bajo algunas circunstancias el esparcimiento (scattering en inglés) puede jugar un papel importante. El término absorción es empleado para describir únicamente el efecto de disminución de la intensidad a causa del material.

Una sustancia puede presentar absorción general si ésta reduce la intensidad de todas las longitudes de onda aproximadamente en la misma proporción. Para luz visible, esto significa que la luz transmitida, vista por el ojo humano, no exhibe color. Existe una reducción de la intensidad total de la luz blanca, y dichas sustancias entonces tienden a aparecer como grises. Ningún material absorbe todas las longitudes de onda de la misma forma, pero algunas como capas

semitransparentes de platino se aproximan bastante a esta condición sobre prácticamente un amplio rango de longitudes de onda.

La absorción selectiva se refiere a la absorción de ciertas longitudes de onda de luz. Prácticamente, todas las sustancias de color tienen dicho color debido a la existencia de la absorción selectiva en alguna parte o partes del espectro visible. Por ejemplo, una pieza de vidrio verde absorbe completamente los rangos de espectro azul y rojo, y la porción de luz restante en el espectro visible que es transmitida se percibe entonces como color verde. Los objetos presentan un color de cuerpo, que se distingue del color de superficie debido a que su color es producido por la luz que penetra una cierta distancia de material y posteriormente, por esparcimiento o reflexión, la luz es desviada y escapa de la superficie pero solo después de haber absorbido selectivamente determinadas longitudes de onda. El color de superficie, por el contrario, es un fenómeno de reflexión selectiva que se presenta en la superficie misma y es característica de materiales como el oro o el cobre.

4.2 Coeficiente de absorción e índice de refracción complejo

Los materiales absorbentes presentan un índice de refracción complejo, tal que $n = n' - in''$, donde n' es el índice de refracción, n'' es el índice de absorción e $i = \sqrt{-1}$. En las muestras transparentes sin absorción $n'' = 0$ y $n = n'$.

Por otra parte, cuando existe atenuación de un haz de luz a lo largo de una muestra, la experiencia demuestra que la intensidad transmitida I depende del grosor z de material que atraviesa el haz y experimentalmente se encuentra que puede ser expresada como:

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (4.1)$$

Siendo I_0 la intensidad óptica del haz de luz antes de atravesar el material. El factor α se denomina coeficiente de absorción, dado que éste es una medida de la razón de pérdida de luz. De esta manera, la transmisión de potencia a través de la muestra es:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha z} \quad (4.2)$$

El decremento de intensidad de luz puede tener un origen distinto a la desaparición real de luz y en su lugar ser producto del esparcimiento (scattering) producido por las partículas cuando el haz las impacta y parte de la potencia es esparcida en direcciones distintas a la dirección del haz incidente. Por ello es importante distinguir la absorción real o verdadera, la cual representa la desaparición de la luz donde la energía es convertida en calor, excitando a las moléculas del material absorbente.

El coeficiente de absorción [16] está relacionado con la parte imaginaria del índice de refracción, tal que:

$$\alpha = \frac{4\pi n''}{\lambda_0} \quad (4.3)$$

donde λ_0 es la longitud de onda de trabajo en el espacio libre. Este parámetro permite definir el nivel de absorbencia de una muestra. Una muestra que presenta un coeficiente de absorción $\alpha < 700\text{mm}^{-1}$ se dice que presenta absorción moderada. Las muestras con $\alpha \ll 700\text{mm}^{-1}$ son consideradas como débilmente absorbentes, de acuerdo al criterio propuesto por [16].

4.3 Reflexión en una interfase con un medio absorbente

La reflexión de la luz en una interfase entre un sólido o líquido no absorbente está determinada por las ecuaciones de Fresnel, de donde se pueden obtener las expresiones de reflectancia de una interfase plana entre un medio absorbente y no absorbente [17]. Asumiendo que la refracción ocurre en el medio absorbente [18], las expresiones para luz polarizada con el vector de campo eléctrico paralelo (p) y perpendicular (s) al plano de incidencia están dados por las ecuaciones:

$$R_p = \frac{M + P^2 x^2 - x(M + y^2)\sqrt{2M + 2L}}{M + P^2 x^2 + x(M + y^2)\sqrt{2M + 2L}} \quad (4.4)$$

$$R_s = \frac{M + x^2 - x\sqrt{2M + 2L}}{M + x^2 + x\sqrt{2M + 2L}} \quad (4.5)$$

donde $x = \cos \theta$, $y = \text{sen} \theta$, $P = (n'/N)^2 + (n''/N)^2$, $L = (n'/N)^2 - (n''/N)^2 - y^2$, y finalmente $M = \sqrt{L^2 + (2n'n''/N^2)^2}$. En estas expresiones θ es el ángulo de incidencia y N es el índice de refracción del medio no absorbente.

En el caso de la luz no polarizada [16], la reflectancia está determinada por la ecuación:

$$R = \frac{1}{2}(R_p + R_s) \quad (4.6)$$

El efecto que produce la absorción de una muestra se muestra en la figura 4.1. Como se puede observar, el comportamiento de la reflectancia cuando la muestra es no absorbente ($n'' = 0$) tiene un comportamiento tal que en el ángulo crítico se presenta una discontinuidad. Con un índice de absorción como el que se muestra en la figura, de apenas $n'' = 10^{-5}$, el gradiente de reflectancia $dR/d\theta$ existe y el ángulo crítico es remplazado por un ángulo crítico aparente en el punto de inflexión de la reflectancia. Este efecto resulta en errores cuando el método del ángulo crítico se emplea para la refractometría, ya que se obtiene un ángulo crítico aparente distinto del ángulo crítico real.

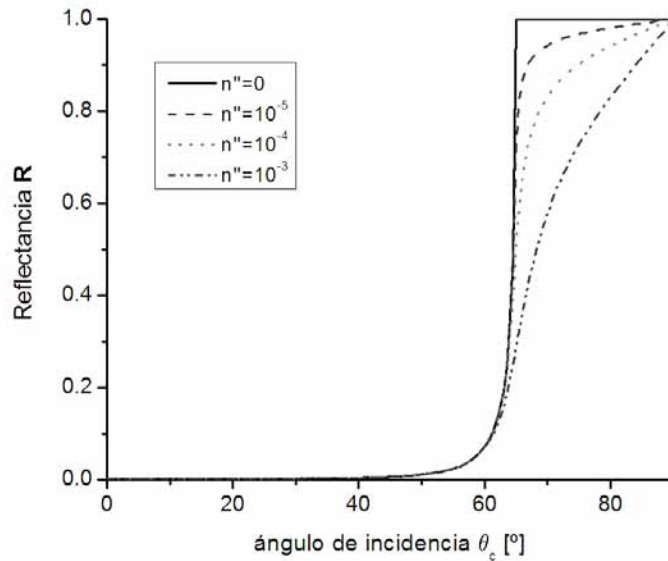


Figura 4.1. Comportamiento de la reflectancia respecto al índice de absorción, produciendo errores en refractometría por ángulo crítico.

4.4 Estudio experimental del efecto de absorción sobre la respuesta del sensor

4.4.1 Efectos cualitativos en la transmisión por medios absorbentes.

El objetivo de este experimento es determinar cualitativamente la existencia de cambios en el comportamiento de la transmisión relativa del sensor cuando el medio externo es ópticamente absorbente.

4.4.1.1 Elaboración de las muestras

Dado que se requiere obtener muestras líquidas absorbentes, es necesario considerar un tinte agregado a cierta cantidad de agua destilada. El adicionar una cantidad de tinte puede tener como consecuencia una variación en el índice de refracción de la muestra, sin embargo, como lo que se desea es conocer los efectos en la respuesta del sensor refractométrico debidos únicamente a la absorción, el cambio presentado debe de ser el mismo para la parte real del índice en cada una de las muestras realizadas.

Para este experimento, se utilizaron diversas muestras líquidas con el fin de tener diferentes sustancias con distinta absorción de la luz. La primera de las muestras es agua destilada como muestra de control. Empleando igualmente agua destilada como disolvente, se añadieron tintes rojo, azul y negro (tinta china) en 2 conjuntos de soluciones, variando entre uno y otro la proporción de tinte adicionado. Para el primer conjunto de muestras se adicionaron 0.52 ml de tinte en 90 ml de agua destilada, lo cual equivale a una proporción del 0.63%. Para el segundo

conjunto de muestras se agregaron 2.2 ml de tinte en 90 ml de agua destilada, es decir, 2.38%. Las muestras de color de cada conjunto tienen la misma cantidad de agua destilada y se les adicionó el mismo volumen de tinta bajo la hipótesis de que, al conservar la razón tinta/agua en las muestras con colorante, su índice de refracción real será idealmente el mismo debido a la composición química similar de los tintes empleados. En forma práctica, las variaciones de la parte real del índice de refracción deberán ser despreciables debido a que la proporción de tinte adicionado al disolvente, en nuestro caso el agua destilada, no representa un volumen tal que pudiera modificar el índice de refracción real del agua considerablemente, aún si hubiera diferencia importante entre la composición química de los diferentes tintes empleados.

4.4.1.2 Instalación experimental

Una vez elaboradas las muestras es necesario medir la absorción por unidad de distancia de cada una de ellas. Para tal efecto, se diseñaron dos recipientes paralelepípedos para la medición de las muestras con la característica de tener las caras de una sección transversal separadas por una distancia considerablemente pequeña ($d_1=2.5\text{mm}$; $d_2=1.3\text{mm}$), a fin de poder obtener muestras altamente absorbentes y poder detectar una señal óptica con potencia suficiente para ser medida.

En la Figura 4.2 se muestra el esquema del arreglo experimental empleado para medir la absorción de cada sustancia.

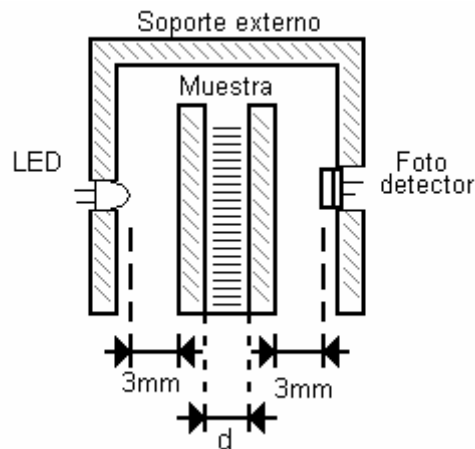


Figura 4.2. Arreglo utilizado para la medición de la absorción de cada sustancia.

Como fuente de radiación, se empleó un LED infrarrojo de GaAlAs marca Everlight modelo IR333C/H0/L10 de un diámetro de área emisora de 5 mm con pico de emisión a 940 nm y ángulo de divergencia de 40°, igual al empleado como fuente de emisión del arreglo experimental del sensor, con el fin de conservar la longitud de onda a la que opera el sensor refractométrico. El circuito que alimenta al LED consiste de un Generador de forma de onda conectado en serie con una resistencia de 132Ω y el LED.

Por otra parte, el circuito fotorreceptor empleado se muestra en la figura 4.3. El fotodiodo empleado para las mediciones es el mismo que se tiene para el circuito fotorreceptor del sensor refractométrico, a fin de conservar las condiciones de trabajo. El fotodiodo opera en modo fotoconductorivo.

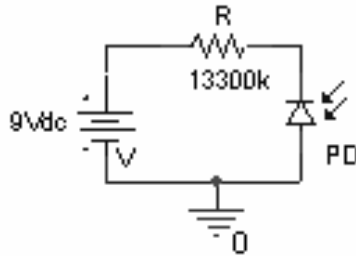


Figura 4.3. Diagrama esquemático del circuito fotorreceptor.

4.4.1.3 Determinación de la absorción relativa

La absorción α_m de cada muestra estará dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha_m = \frac{I_m}{I_0} \quad (4.7)$$

Donde I_m es la intensidad de radiación óptica a través el medio m , I_0 es la intensidad de radiación óptica a través del vacío la cual por razones prácticas será la intensidad a través del aire ya que $n_{\text{aire}} \approx n_o$. Para el agua destilada se tiene:

$$\alpha_{H_2O} = \frac{I_{H_2O}}{I_0} \quad (4.8)$$

Debido a la construcción geométrica y la disposición de los elementos de la instalación experimental, existe un efecto de enfoque en el contenedor cuando se encuentra lleno de líquido. Asimismo, se busca determinar la relación de efectos de atenuación para un mismo medio líquido, que para nuestro es el agua destilada empleada como disolvente. Por ello, la absorción de cada sustancia es referida como una razón de la absorción de la solución con tinte a la absorción en la muestra de agua destilada, obteniendo una absorción relativa, esto es:

$$\alpha_r = \frac{\alpha_m}{\alpha_{H_2O}} \quad (4.9)$$

Entonces, de las ecuaciones 4.7 y 4.8 la absorción relativa α_r está dada por:

$$\alpha_r = \frac{I_m}{I_{H_2O}} \quad (4.10)$$

Como es de nuestro interés determinar si un medio es altamente absorbente, medianamente absorbente o poco absorbente y esta característica esta determinada por la atenuación logarítmica de la señal en una distancia dada, para cada sustancia se obtuvo la relación de atenuación por unidad de distancia d ; determinada por la siguiente ecuación.

$$\alpha_d = \frac{1}{d} 10 \log_{10} \alpha_r \quad [dB/mm] \quad (4.11)$$

Sustituyendo la ecuación 4.10 en la expresión 4.11 y teniendo en cuenta que la intensidad óptica es proporcional al voltaje obtenido a la salida del circuito foto detector,

$$\alpha_d = \frac{1}{d} 10 \log_{10} \frac{V_m}{V_{H_2O}} \quad [dB/mm] \quad (4.12)$$

Donde V_m es el voltaje obtenido a la salida del detector proporcional a la transmisión óptica para la muestra m , V_{H_2O} es el voltaje proporcional a la transmisión óptica para el agua destilada, y d es la distancia de separación entre las paredes del contenedor.

Así, para cada conjunto de muestras empleadas, se presenta en la Tabla 4.1 el voltaje proporcional a la transmisión de la muestra, la transmisión relativa al agua y el coeficiente de atenuación α_w respecto al agua por unidad de distancia. Los datos presentados resultan del promedio de 4 lecturas hechas con un minuto de diferencia entre cada una de ellas para cada una de las muestras. Previo a la medición de una muestra, el recipiente fue lavado con el fin de eliminar posibles residuos de la muestra anterior.

Tabla 4.1. Absorción de cada muestra.

<i>Vol. de tinte [ml]</i>	<i>Muestra</i>	<i>Transmisión [V]</i>	<i>Distancia [mm]</i>	<i>Transmisión relativa al Agua</i>	<i>Atenuación por unidad de distancia [dB/mm]</i>
0	Agua Destilada	7.645	2.5	1	0
0.52	Agua con tinte rojo	7.585	2.5	0.9914	0.015
	Agua con tinte azul	7.4825	2.5	0.9626	0.066
	Agua con tinte negro	0.0808	2.5	0.0110	8.03
0	Agua Destilada	7.645	1.3	1	0
2.2	Agua con tinte rojo	7.585	1.3	0.9922	0.026
	Agua con tinte azul	7.4825	1.3	0.9787	0.072
	Agua con tinte negro	0.0808	1.3	0.0106	15.20

4.4.1.4 Medición de la transmisión

Una vez conocida la absorción de las muestras, se eligieron 5 distancias relativas de las fibras en el sensor para realizar las mediciones de transmisión relativa: 0.9067, 0.9133, 0.92, 0.9267 y 0.9333. Para cada una de estas posiciones se midió la transmisión absoluta de las muestras bajo la siguiente metodología:

1. Se fija la posición de las fibras ópticas en la distancia que se desee medir.
2. Inicia la toma de datos de una muestra: se hace una medición, sucesivamente, del aire y de la muestra (el aire y la muestra representan el medio externo al elemento óptico).
3. Se hace una limpieza de la superficie del elemento óptico que está en contacto con el medio externo.
4. Se repite el procedimiento desde (2) hasta haber realizado mediciones sobre el aire y la muestra en cuatro ocasiones.
5. Se cambia de muestra y se repiten los pasos desde (2) hasta haber experimentado con cada una de las muestras líquidas absorbentes con las que se cuenta.
6. Se cambia la posición de las fibras ópticas al siguiente punto elegido a experimentar.
7. Se repiten los pasos desde (2) hasta haber recorrido todas las distancias elegidas.

Las lecturas de transmisión se toman mediante el programa *PTP01*, el cual fue configurado de manera que una medición sea conformada por el promedio de diez lecturas, separadas en tiempo un segundo. Los detalles del programa se encuentran en el apéndice correspondiente. Los resultados de las mediciones y su discusión se muestran en la sección de resultados.

4.4.2 Cuantificación de los efectos de la absorción en la transmisión

El objetivo de este experimento es indagar si existe alguna relación matemática entre la absorción y las variaciones en la transmisión; y de ser el caso, establecer la misma.

4.4.2.1 Elaboración de las muestras

Para realizar las muestras se tomo como base nuevamente 90 ml de agua destilada y se formaron cuatro muestras con distintas proporciones de tinte rojo que servirán como muestras de control para el índice de refracción real, y análogamente cuatro muestras de tinte negro. Estas muestras con diversas proporciones de tinte negro se realizan con la finalidad de obtener diferentes niveles de absorción.

4.4.2.2 Determinación del coeficiente de absorción e índice de absorción

Para obtener la parte compleja del índice de refracción y el coeficiente de absorción se utilizó la misma instalación experimental descrita en el experimento anterior con una separación entre las placas $d=1.3\text{mm}$.

De acuerdo a la metodología seguida en el experimento anterior, se obtiene la transmisión relativa al agua o al tinte rojo, eliminando así el efecto de enfoque y las pérdidas comunes por las paredes del contenedor, así:

$$T_{rel} = \frac{I_m}{I_{H_2O}} \quad (4.13)$$

donde I_m es la intensidad óptica luego de atravesar el volumen de la muestra con tinte negro, mientras que I_{H_2O} es la intensidad óptica luego de atravesar la muestra con tinte rojo. A partir de la transmisión relativa al agua es posible obtener la transmisión en el aire, ya que el coeficiente de absorción del agua es un valor conocido. El coeficiente de absorción a una temperatura de 300K alrededor de la longitud de onda de trabajo ($\lambda=940\text{nm}$) se muestra en la tabla 4.2 [19].

Tabla 4.2. Coeficiente de extinción del agua destilada alrededor de $\lambda=940\text{nm}$

$\lambda[\text{nm}]$	$\alpha[\text{mm}^{-1}]$
935	0.0158
943	0.0214

Interpolando el coeficiente de absorción para $\lambda=940\text{nm}$ se tiene un coeficiente $\alpha=0.0193\text{mm}^{-1}$. De acuerdo a la ecuación 5.2. La transmisión relativa al aire (en 1.3mm de espesor de agua) resulta:

$$T_{H_2O} = e^{-\alpha z} = e^{-(0.0193\text{mm}^{-1})(1.3\text{mm})} = 0.9752$$

La transmisión del tinte negro T relativa al aire resulta del producto de la transmisión relativa al agua y la transmisión del agua, es decir $T = T_{rel} T_{H_2O}$.

El coeficiente de absorción de cada muestra de tinte negro se obtiene al despejar α de la ecuación 4.2, es decir:

$$\alpha = -\frac{\ln T}{z} \quad (4.14)$$

Y la parte imaginaria del índice de refracción se despeja de la ecuación 4.3 tal que:

$$n'' = \frac{\alpha \lambda_0}{4\pi} \quad (4.15)$$

La tabla 4.3 muestra los valores obtenidos para el coeficiente de absorción y el índice de absorción.

Tabla 4.3. Medición de las propiedades absorbentes de las muestras.

<i>Proporción de tinte %</i>	0	0.6	1.2	1.8	2.4
<i>Intensidad en agua [V]</i>	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66
<i>Intensidad tinte negro [V]</i>	-	1.59	0.337	0.070	0.031
<i>Transmisión relativa al agua T_{H_2O}</i>	1	0.2387	0.0506	0.0107	0.0047
<i>Transmisión relativa al aire T</i>	0.9752	0.2328	0.0493	0.0104	0.0046
<i>Porcentaje de atenuación</i>	2.47	76.72	95.07	98.95	99.54
<i>Coeficiente de absorción α</i>	0.0193	1.1211	2.3145	3.5106	4.1430
<i>Índice de absorción n'' (10^{-6})</i>	1.4437	83.864	173.13	262.60	309.91

4.4.2.3 Transmisión del sensor

Para las cuatro muestras con tinte negro, las cuatro muestras con tinte rojo y el agua destilada, se realizaron mediciones de la transmisión relativa cuando las fibras ópticas se encuentran en la posición relativa $\Lambda=0.92$. La metodología que se siguió para realizar las mediciones es la siguiente:

1. Se realiza una medición, sucesivamente, de la transmisión del aire y de la muestra (el aire y la muestra representan el medio externo al elemento óptico).
2. Se hace una limpieza de la superficie del elemento óptico que está en contacto con el medio externo.
3. Se repite el procedimiento hasta haber realizado mediciones sobre el aire y la muestra en cuatro ocasiones.
4. Se cambia de muestra y se repiten los pasos desde (2) hasta haber experimentado con cada una de las muestras líquidas absorbentes con las que se cuenta.

En el caso de la transmisión relativa del agua, el valor promedio obtenido fue 0.64722. Para las muestras con tinte, La tabla 4.4 muestra los valores de transmisiones relativas obtenidas.

Tabla 4.4. Transmisión del sensor para las diferentes muestras

<i>Proporción de tinte</i>	<i>Transmisión relativa</i>	
	<i>Tinte Rojo (T)</i>	<i>Tinte Negro (T')</i>
0.6	0.64932	0.64179
1.2	0.64671	0.62591
1.8	0.64527	0.61672
2.4	0.64322	0.60608

4.5 Resultados del experimento

4.5.1 Efectos cualitativos de la absorción en el sensor

De los datos obtenidos en el primer experimento, se observa claramente modificaciones en la transmisión que pueden ser relacionadas al nivel de absorción del medio externo al elemento óptico, como lo muestran las figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

La gráfica de la figura 4.4 muestra la transmisión relativa contra la distancia relativa de las fibras ópticas para el primer conjunto de mediciones. La figura 4.5 muestra las mismas variables para el segundo conjunto.

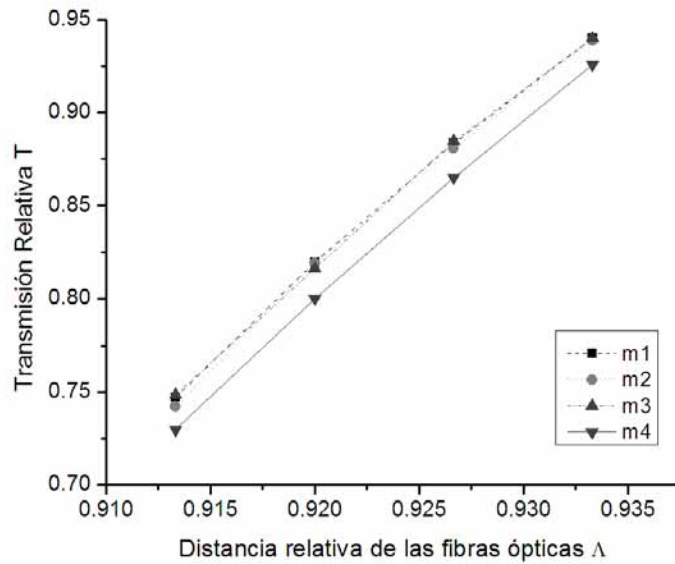


Figura 4.4. Detalle de la transmisión relativa contra distancia relativa de las fibras para el primer conjunto de mediciones

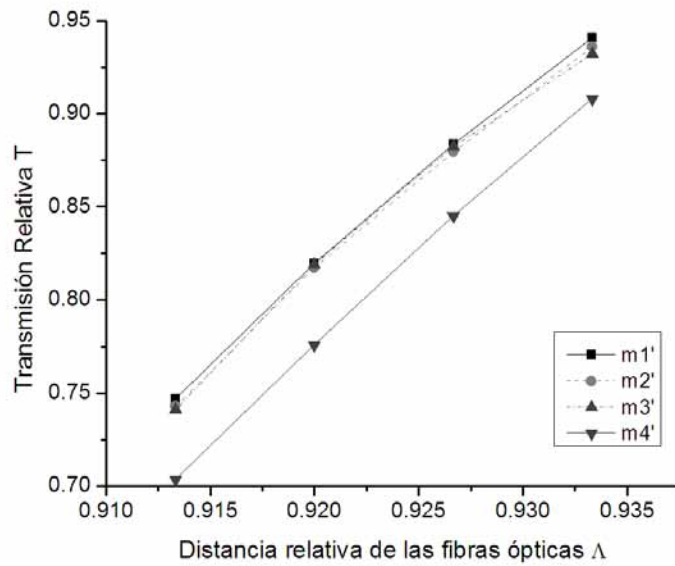


Figura 4.5. Detalle de la transmisión relativa contra distancia relativa de las fibras para el segundo conjunto.

Se tiene la certeza de que los cambios en la respuesta del sensor refractométrico para las muestras de alta absorbencia son debidos a modificaciones en la parte compleja del índice de refracción de las muestras y no a su parte real, pues la transmisión para el agua destilada y para muestras con poca absorbencia (muestras con tinte rojo y azul) son prácticamente las mismas y las variaciones presentadas para dichas muestras se encuentran dentro del rango de error que presenta el sistema.

Esto nos confirma la hipótesis de que la parte real del índice de refracción es la misma para todas las muestras y se evalúa mediante este experimento los efectos debidos únicamente a la absorción.

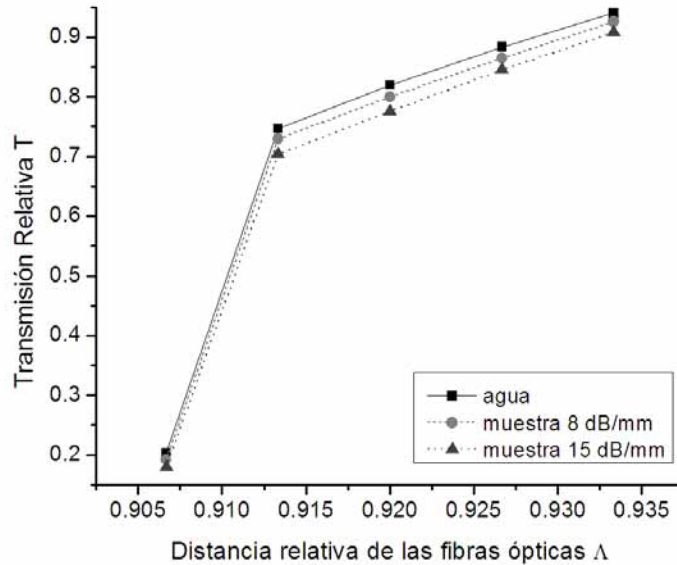


Figura 4.6. Combinación de la transmisión relativa de los dos conjuntos.

En la Figura 4.4 se puede apreciar que, en distancias menores a $\Lambda=0.9133$, el efecto producido en la transmisión relativa es menor, claramente perceptible en el comportamiento de la muestra con absorción de 8 dB/mm. Así, para la posición relativa de fibras $\Lambda=0.9067$ se tiene una diferencia entre la transmisión relativa de la muestra de 8 dB/mm y la transmisión relativa de las muestras poco absorbentes de $\Delta T^*=0.0111$. Esto abre la posibilidad de realizar mediciones del índice de refracción de fluidos en la vecindad de 1.333 sin alteraciones considerables en los valores obtenidos por efectos de tal nivel de absorción. La desventaja principal radica en que la posibilidad de discriminación se reduce a un rango de variación en el índice de refracción pequeña, limitado por la transmisión relativa máxima alcanzable a un cierto rango de error permisible.

En el caso de la muestra con atenuación de 15.2 dB/mm, la diferencia de transmisión relativa con respecto a la transmisión relativa del agua es considerablemente mayor, presentándose la mayor diferencia para $\Lambda=0.92$, ($\Delta T^*=0.04398$), como se aprecia en la Figura 4.5. La tendencia que sigue el comportamiento es semejante a aquél obtenido para la muestra con atenuación de 8 dB/mm: en posiciones relativas de las fibras menores a $\Lambda=0.9133$ se presenta menor desviación por efecto de la absorción.

La Tabla 4.5 resume las desviaciones máxima y mínima de transmisión relativa, las posiciones donde se presenta para las muestras empleadas clasificadas de acuerdo a su nivel de absorción relativa en dB/mm.

Tabla 4.5. Desviación máxima y mínima de transmisión relativa.

Atenuación por cada mm	ΔT mínima	Λ para desviación. Mínima	ΔT máxima	Λ para desviación máxima
8.12 dB/mm	0.01109	0.9067	0.0196	0.92
15.8 dB/mm	0.023446	0.9067	0.0440	0.92

De los resultados anteriores, se puede decir que las variaciones presentadas son debidas a que el índice de refracción en su parte imaginaria es distinto que el presentado por el agua destilada.

4.5.2 Cuantificación de los efectos de la absorción en el sensor

En el segundo experimento se generaron más muestras absorbentes con el fin de buscar una relación matemática. Emplear una muestra de control con tinte rojo permitió mantener el criterio de comparación respecto a la variación del índice de refracción en su parte real.

Si bien es cierto que los niveles de absorción que presentan las muestras empleadas aun se encuentran dentro de niveles catalogados como absorción débil, al analizar la tabla 4.3 es posible observar que los porcentajes de atenuación de las muestras absorbentes reducen la intensidad de la señal óptica hasta 99.95% por cada milímetro, esto es, 17.9 dB/mm.

Teniendo en cuenta la variación que existe en la transmisión relativa de las muestras absorbentes, en la tabla 4.5 se presenta la diferencia entre la transmisión relativa cuando el medio era tinte rojo y la transmisión relativa con muestra absorbente, así como el coeficiente de absorción y la parte imaginaria del índice de refracción complejo.

Tabla 4.5. Índice de absorción, coeficiente de absorción y diferencia de transmisión de las muestras.

n''	α	$\Delta T = T - T'$
1.444E-06	0.01930	0.00000
8.386E-05	1.12113	0.00752
1.731E-04	2.31452	0.02079
2.626E-04	3.51063	0.02856
3.099E-04	4.14302	0.03714

La figura muestra la gráfica de $T - T'$ contra n'' . Los puntos representan los valores medidos y la línea sólida es el ajuste lineal, el cual presenta un coeficiente de determinación de 0.991.

La ecuación lineal que relaciona la parte imaginaria del índice complejo con la diferencia de transmisiones, resultado del ajuste, es:

$$n'' = (8.3928 \times 10^{-3}) \Delta T + 8.40 \times 10^{-6} \quad (4.16)$$

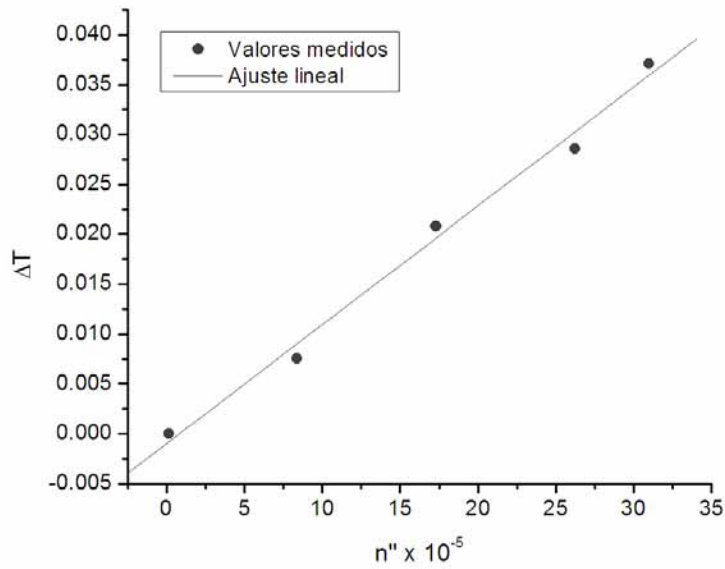


Figura 4.7. Variación de la transmisión relativa con respecto al índice de absorción.

De igual forma, es posible graficar el coeficiente de absorción contra la diferencia ΔT como se muestra en la figura. De manera análoga, el ajuste lineal presenta un coeficiente de determinación de 0.992.

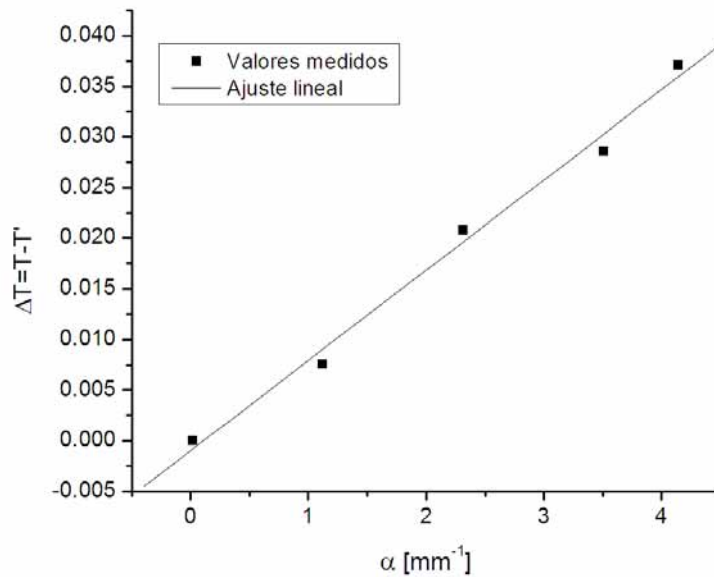


Figura 4.8. Variación de la transmisión relativa con respecto al coeficiente de absorción.

De manera análoga, la ecuación que relaciona el coeficiente de absorción con la diferencia de transmisiones es:

$$\alpha = 112.2\Delta T + 0.112 \quad [mm^{-1}] \quad (4.17)$$

Al obtener las diferencias de transmisión entre las muestras líquidas no absorbentes y las muestras absorbentes, se constata la variación de la transmisión incluso para la muestra con menor absorción. Más aún, esta variación de la transmisión sí es dependiente del coeficiente de absorción de la muestra y se destaca la existencia de una relación lineal entre el índice de absorción n'' y las variaciones de transmisión relativas que se midieron con el sensor refractométrico en el rango de coeficientes de absorción considerado.

Teniendo en cuenta la desviación estándar ($\sigma=0.0040$) de la transmisión relativa para la posición $\Lambda=0.92$ y las ecuaciones 4.16 y 4.17 ajustadas linealmente a los resultados, es posible determinar el nivel de absorción que podría afectar las mediciones de la transmisión relativa de las muestras, al inducir un error en la medición del índice de refracción. El coeficiente de absorción y el índice de absorción correspondientes son $\alpha = 0.896[mm^{-1}]$ y $n'' = 6.71 \times 10^{-5}$.

4.5.3 Factor de corrección de la transmisión relativa

Como lo muestran las ecuaciones 4.16 y 4.17, es posible establecer una ecuación que relaciona la diferencia entre la transmisión relativa de una muestra transparente y la transmisión cuando la muestra con mismo índice de refracción real es absorbente; de tal manera que se puede proponer un método de corrección, operante a partir de niveles de absorción que equiparen la precisión del sensor. Debido al ajuste matemático, las ecuaciones en las que $\Delta T = f(\alpha)$ o bien $\Delta T = f(n'')$, arrojan un valor de ordenada al origen, sin embargo estas ecuaciones deberían ser de la forma $\Delta T = m_{\alpha}\alpha$, y $\Delta T = m_{n''}n''$, donde m en cada ecuación representa la pendiente de la recta de ajuste; y como se observa, no tomando en cuenta ninguna ordenada al origen ya que idealmente no existe variación en la transmisión relativa cuando no existe absorción. Estas dos funciones matemáticas dan pie a la posibilidad de introducir un factor de corrección en el procesamiento de datos, si se conoce el coeficiente de absorción α , o el índice de absorción n'' . La metodología para llevar a cabo esta corrección en el procesamiento de datos sería la siguiente:

1. Conocer el factor de corrección m_{α} o $m_{n''}$ para una posición relativa de las fibras ópticas Λ determinada.
2. Establecer el umbral a partir de la precisión del sensor, es decir, el nivel de absorción a partir del cual entra en operación el factor de corrección.
3. Obtener la diferencia de transmisión relativa ΔT .
4. A partir de la diferencia de transmisión relativa, obtener la transmisión real, ya que $\Delta T = T - T'$ donde T es la transmisión real y T' es la transmisión relativa aparente.

Un sistema que podría ser propuesto basado en fibras ópticas aprovechando la misma fibra óptica se muestra en la figura 4.9, adicionando una celda de un espesor reducido (1 mm) seccionando la fibra óptica de entrada, para medición de la absorción. La metodología de medición adecuada podría ser:

1. Obtener la medición de transmisión absoluta cuando el elemento semiesférico se encuentra en el aire y la celda se encuentra vacía, llamada I_{a-a}
2. Obtener la medición de transmisión absoluta cuando el elemento semiesférico se encuentra en el aire y la celda se encuentra llena de material absorbente, representada por I_{a-m}
3. Obtener la medición de transmisión absoluta cuando el elemento semiesférico se encuentra inmerso en la muestra absorbente, y la celda se encuentra vacía, esto es, I_{m-a}
4. Obtener la transmisión relativa T a partir del cociente I_{m-a}/I_{a-a} y obtener α que será proporcional al cociente I_{a-m}/I_{a-a} .

Finalmente aplicar el factor de corrección de acuerdo a la metodología descrita con anterioridad.

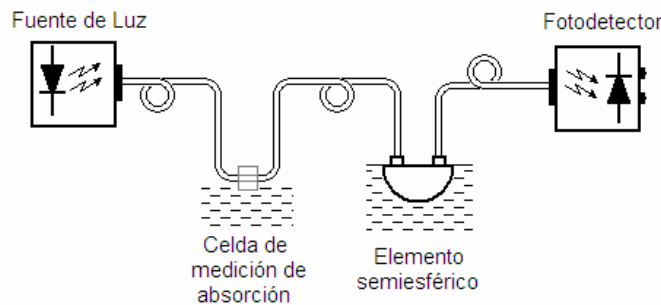


Figura 3.9. Sensor propuesto para corrección de transmisión relativa.

Sin embargo, este sistema tendría que ser analizado ya que no es tan trivial como puede parecer.

4.6 Conclusiones

En los resultados se encontró que existe una variación en la transmisión relativa debido a los efectos de la absorción de las muestras. Dicha variación en la transmisión relativa mantiene una relación lineal con el coeficiente de absorción del medio y con la parte imaginaria de su índice de refracción. Esta relación se conserva en el rango de coeficientes de absorción de 0 a 4.14 mm^{-1} , o bien para índice de absorción de 0 a 31×10^{-5} . Las muestras empleadas presentan absorción donde la pérdida de potencia en 1 mm de espesor de material supera el 99.5%, es decir, una pérdida por unidad de longitud de 17.9 dB/mm para la muestra en la que $\alpha = 4.14 \text{ mm}^{-1}$.

La relación lineal encontrada permite proponer un mecanismo de corrección al momento de realizar el procesamiento de los datos, que dependerá de la posición relativa de las fibras ópticas Λ y que sea tomado en cuenta a partir de un umbral de absorción determinado a partir de la precisión del sensor implementado experimentalmente. Asimismo, una posible implementación para realizar a cabo las mediciones de absorción aprovechando los elementos existentes del sensor es propuesta.

Conclusiones Generales

El empleo de fibras ópticas en desarrollos de sensores permite explotar las ventajas que proporcionan las mismas, principalmente en medios hostiles y donde factores como la interferencia electromagnética puedan provocar errores en la medición de determinados parámetros.

La refractometría permite realizar la medición y monitoreo de diversas propiedades físicas o químicas de las sustancias en tanto éstas se encuentren relacionadas con el índice de refracción. Así, el sensor refractométrico en fibras ópticas con elemento semiesférico tiene un campo de aplicación amplio, destacándose la posibilidad de ser empleado en procesos industriales, control de calidad e incluso procesos biomédicos.

Se probó que el empleo de un modelo físico lo suficientemente grande facilita la variación de los parámetros geométricos del sensor con alta precisión y permite la caracterización confiable del sensor. Las características y resultados que puedan arrojar las mediciones son aplicables independientemente de las dimensiones físicas.

El circuito fotorreceptor implementado presenta propiedades que lo hacen adecuado en diversas aplicaciones donde el sensor pueda ser utilizado. La configuración híbrida de amplificador de transimpedancia y amplificador no inversor permite realizar la transducción de fotocorriente a voltaje y proporcionar una alta ganancia en el mismo circuito integrado de amplificador operacional. Esto resulta ventajoso en la implementación principalmente donde se requieren arreglos de sensores o bien en aplicaciones de sensado remoto donde las pérdidas en las fibras ópticas puedan ser considerables.

La caracterización del sensor en el aire mostró una muy cercana coincidencia con las simulaciones, estableciendo con ello el criterio de calibración de la instalación experimental. A pesar de que las condiciones consideradas para la realización de las simulaciones numéricas de la respuesta del sensor son distintas a las experimentales.

Las pruebas experimentales de absorción arrojan resultados importantes que no habían sido considerados en trabajos previos sobre este sensor. Se confirmó la hipótesis de una posible

modificación en el comportamiento del sensor cuando las muestras a medir son líquidos no transparentes, de acuerdo a las pruebas cualitativas realizadas. Se garantizó que estas variaciones no son debidas a modificaciones en la parte real del índice de refracción gracias a una muestra de control.

Las pruebas realizadas dieron pie a la búsqueda de una relación posible entre la absorción de la muestra y la transmisión relativa, encontrándose que en muestras catalogadas como débilmente absorbentes de acuerdo al criterio de [16] sí afectan a la transmisión del sensor. Si bien es cierto que las muestras se consideran débilmente absorbentes, la atenuación de potencia alcanza el 99.5% en 1 mm de espesor, esto es, una atenuación de 17.9 dB/mm.

A partir de las mediciones se pudo establecer una relación lineal entre la desviación de la transmisión relativa y el coeficiente de absorción o el índice de absorción. Asimismo, fue posible determinar la absorción que resultaría en una medición errónea de transmisión relativa, esto teniendo en cuenta la precisión con que cuenta la instalación experimental que se implementó.

Con base en las relaciones lineales encontradas se propone la posibilidad de establecer un factor de corrección en el procesamiento de los datos una vez que la absorción supere el umbral de precisión del sensor. En este sentido, también se propone una posible implementación del sensor refractométrico que pudiera realizar las mediciones del coeficiente de absorción aprovechando los elementos que conforman al sensor refractométrico.

Un trabajo posterior llevaría a indagar teóricamente sobre los efectos de la absorción en el sensor, ya que experimentalmente se pudo demostrar la alteración en el comportamiento del mismo debido a muestras no transparentes. Para este fin, se podría considerar las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6 en el cálculo de la reflectancia de los modelos de simulación numérica desarrollados por [1].

En el sentido experimental, sería posible investigar la relación existente entre la diferencia de la transmisión relativa del sensor y la absorción cuando se trata de muestras altamente absorbentes de acuerdo al criterio de [16]. Así mismo, podría ser analizada e implementada una configuración capaz de realizar la corrección en la transmisión, ya sea el esquema propuesto o bien una configuración diferente.

Apéndice A. Datos de dispositivos electrónicos

Diodo emisor de luz Everlight modelo IR333C/H0/L10

Absolute Maximum Ratings at $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Rating	Unit	Notice
Continuous Forward Current	I_F	50	mA	
Peak Forward Current Pulse width=100 μ s, Duty cycle=1%	I_{FP}	1.0	A	
Reverse Voltage	V_R	5	V	
Operating Temperature	T_{opr}	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$	
Soldering Temperature	T_{sol}	260	$^\circ\text{C}$	4mm from mold body less than 5 seconds
Power Dissipation at(or below) 25 $^\circ\text{C}$ Free Air Temperature	P_d	100	mW	

Electronic Optical Characteristics :

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Condition
Radiant Intensity	E_e	7.8	10	----	mW/sr	$I_F=20\text{mA}$
		----	45	----		$I_F=100\text{mA}, t_p=100\mu\text{s}, t_r/T=0.01$
		----	450	----		$I_F=1\text{A}, t_p=100\mu\text{s}, t_r/T=0.01$
Peak Wavelength	λ_p	----	940	----	nm	$I_F=20\text{mA}$
Spectral Bandwidth	$\Delta\lambda$	----	45	----	nm	$I_F=20\text{mA}$
Forward Voltage	V_F	----	1.2	1.5	V	$I_F=20\text{mA}$
		----	1.4	1.85		$I_F=100\text{mA}, t_p=100\mu\text{s}, t_r/T=0.01$
		----	2.6	4.0		$I_F=1\text{A}, t_p=100\mu\text{s}, t_r/T=0.01$
Reverse Current	I_R	----	----	10	μA	$V_R=5\text{V}$
View Angle	$2\theta_{1/2}$	----	40	----	deg	$I_F=20\text{mA}$

Typical Electrical/Optical/Characteristics Curves

Fig. 2 Spectral Distribution

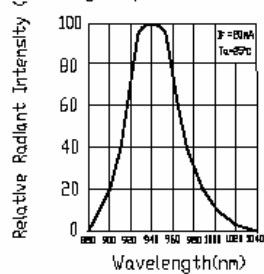


Fig. 5 Relative Intensity vs. Forward Current

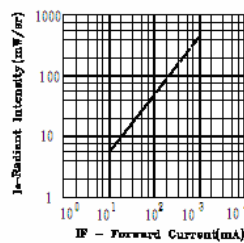
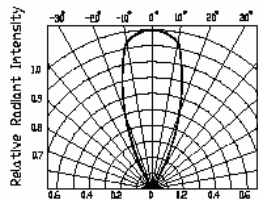


Fig. 6 Relative Radiant Intensity vs. Angular Displacement



LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357 JFET Input Operational Amplifiers

General Description

These are the first monolithic JFET input operational amplifiers to incorporate well matched, high voltage JFETs on the same chip with standard bipolar transistors (BI-FET™ Technology). These amplifiers feature low input bias and offset currents/low offset voltage and offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection. The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low 1/f noise corner.

Features

Advantages

- Replace expensive hybrid and module FET op amps
- Rugged JFETs allow blow-out free handling compared with MOSFET input devices
- Excellent for low noise applications using either high or low source impedance—very low 1/f corner
- Offset adjust does not degrade drift or common-mode rejection as in most monolithic amplifiers
- New output stage allows use of large capacitive loads (5,000 pF) without stability problems
- Internal compensation and large differential input voltage capability

Applications

- Precision high speed integrators
- Fast D/A and A/D converters
- High impedance buffers
- Wideband, low noise, low drift amplifiers

- Logarithmic amplifiers
- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

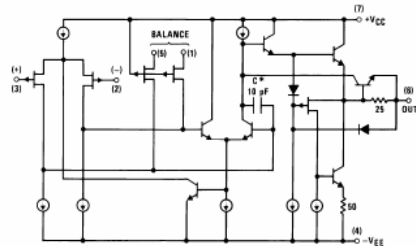
Common Features

- Low input bias current: 30pA
- Low Input Offset Current: 3pA
- High input impedance: $10^{12}\Omega$
- Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- High common-mode rejection ratio: 100 dB
- Large dc voltage gain: 106 dB

Uncommon Features

- | | LF155/
LF355 | LF156/
LF256/
LF356
($A_{\text{CM}}=5$) | LF257/
LF357
($A_{\text{CM}}=5$) | Units |
|---|-----------------|--|--|------------------------------|
| ■ Extremely fast settling time to 0.01% | 4 | 1.5 | 1.5 | μs |
| ■ Fast slew rate | 5 | 12 | 50 | V/ μs |
| ■ Wide gain bandwidth | 2.5 | 5 | 20 | MHz |
| ■ Low input noise voltage | 20 | 12 | 12 | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |

Simplified Schematic



*5pF in LF357 series.

BI-FET™, BI-FET II™ are trademarks of National Semiconductor Corporation.

DC Electrical Characteristics

(Note 2)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356/8			LF355/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{IO}	Input Offset Voltage	$R_{\text{F}}=50\text{k}\Omega$, $T_{\text{A}}=25^\circ\text{C}$ Over Temperature	5	5	1	3	5	3	10	13	mV	
$\text{d}V_{\text{IO}}/\text{d}T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_{\text{F}}=50\text{k}\Omega$	5			8		5			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
$\Delta\text{TC}/\text{d}V_{\text{IO}}$	Change in Average TC with V_{IO} Adjust	$R_{\text{F}}=50\text{k}\Omega$ (Note 4)	0.5			0.5		0.5			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV	
I_{BI}	Input Offset Current	$T_{\text{A}}=25^\circ\text{C}$ (Notes 3, 5) $T_{\text{A}} \text{ d}I_{\text{BI}}/\text{d}T$	3	20	20	3	20	1	3	30	pA	

DC Electrical Characteristics (Continued)

(Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356/8			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
I_{B}	Input Bias Current	$T_{\text{A}}=25^\circ\text{C}$ (Notes 3, 5) $T_{\text{A}} \text{ d}I_{\text{B}}/\text{d}T$	30	100	80	30	100	5	30	200	pA	
R_{IN}	Input Resistance	$T_{\text{A}}=25^\circ\text{C}$	10^{12}			10^{12}			10^{12}		Ω	
A_{VOL}	Large Signal Voltage Gain	$V_{\text{IN}}=10\text{V}$, $T_{\text{A}}=25^\circ\text{C}$ $V_{\text{OUT}}=10\text{V}$, $R_{\text{L}}=2\text{k}\Omega$ Over Temperature	50	200	25	50	200	25	200	25	dB	
V_{OC}	Output Voltage Swing	$V_{\text{IN}}=15\text{V}$, $R_{\text{L}}=10\text{k}\Omega$ $V_{\text{IN}}=15\text{V}$, $R_{\text{L}}=2\text{k}\Omega$	± 12	± 13	± 12	± 12	± 13	± 12	± 13	± 13	V	
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V_{\text{IN}}=15\text{V}$	± 11	± 12	± 11	± 12	± 12	± 10	± 12	± 12	V	
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio		88	100	88	100	88	100	88	100	dB	
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	88	100	88	100	88	100	88	100	dB	

DC Electrical Characteristics

$T_{\text{A}} = T_{\text{C}} = 25^\circ\text{C}$, $V_{\text{IN}} = \pm 15\text{V}$

Parameter	LF155		LF256		LF156/256/257/356/8		LF356		LF357		Units
	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	
Supply Current	2	4	2	4	5	7	5	10	5	10	mA

AC Electrical Characteristics

$T_{\text{A}} = T_{\text{C}} = 25^\circ\text{C}$, $V_{\text{IN}} = \pm 15\text{V}$

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/355	LF156/256/ 356/8	LF156/256/356/ LF356/8	LF257/357	Units
			Typ	Min	Typ	Typ	
SR	Slew Rate	LF155/6 $A_{\text{CM}}=1$ LF357, $A_{\text{CM}}=5$	5	7.5	12	50	V/ μs
GBW	Gain Bandwidth Product		2.5		5	20	MHz
t_{S}	Settling Time to 0.01%	(Note 7)	4		1.5	1.5	μs
e_{N}	Equivalent Input Noise Voltage	$R_{\text{F}}=100\text{k}\Omega$ $f=100 \text{ Hz}$	25		15	15	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f=1000 \text{ Hz}$	20		12	12	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
i_{N}	Equivalent Input Current Noise	$f=100 \text{ Hz}$	0.01		0.01	0.01	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f=1000 \text{ Hz}$	0.01		0.01	0.01	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
C_{IN}	Input Capacitance		3		3	3	pF

Apéndice B. Código fuente de adquisición de datos

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
            end
        end
        medicion=1;
    end
    bandera=0;
end

```

```

end                                     % por tiempo_datos
                                     % entre lecturas.

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 ')

```

Apéndice C. 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. Garcia-Guerra, J. E. Morales-Farah, L. E. Yam-Ontiveros.

Measurement of water salinity using optical fiber refractometric transducer

Представлены экспериментальные результаты по измерению солености воды с помощью рефрактометрического волоконно-оптического датчика. В датчике использован оптический чувствительный элемент в форме полусферы, в котором используется взаимосвязь между соленостью воды и ее показателем преломления. В настоящей работе описан принцип действия датчика, конструкция экспериментальной установки, и результаты измерения солености воды с помощью описанного датчика. Показано, что датчик может измерять соленость 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.

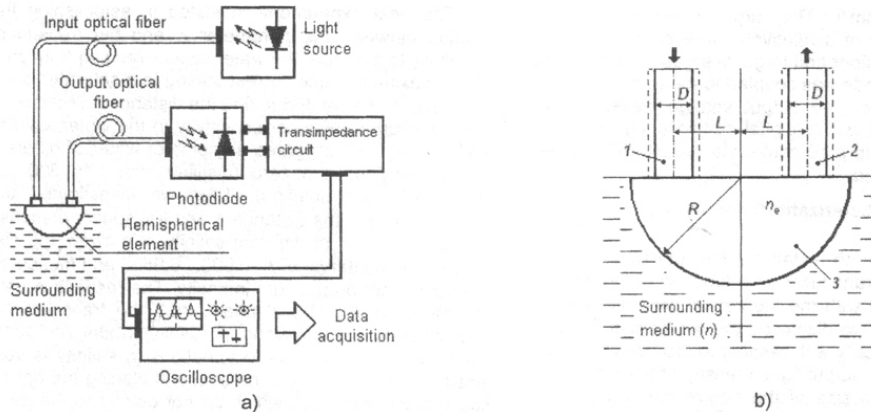


Fig 1. Schematic diagram of the optical fiber refractometric transducer (a) and the 2D view of the optical detection element (b): (1) – input optical fiber, (2) – output optical fiber, (3) – hemispherical optical detection element (glass).

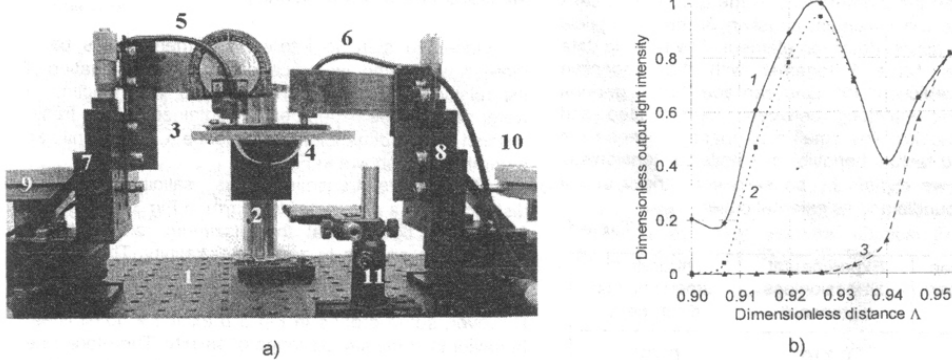


Fig 2. (a) – General view of the experimental setup: (1) – optical breadboard, (2) – post, (3) – platform, (4) – hemispherical optical element, (5), (6) – optical fiber, (7) – sample support; (b) – Output light relative intensity relative to maximum vs. the optical fiber position Δ for different surrounding 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 $40^\circ_{0.5}$. 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 $40^\circ_{0.05}$.

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 st	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.

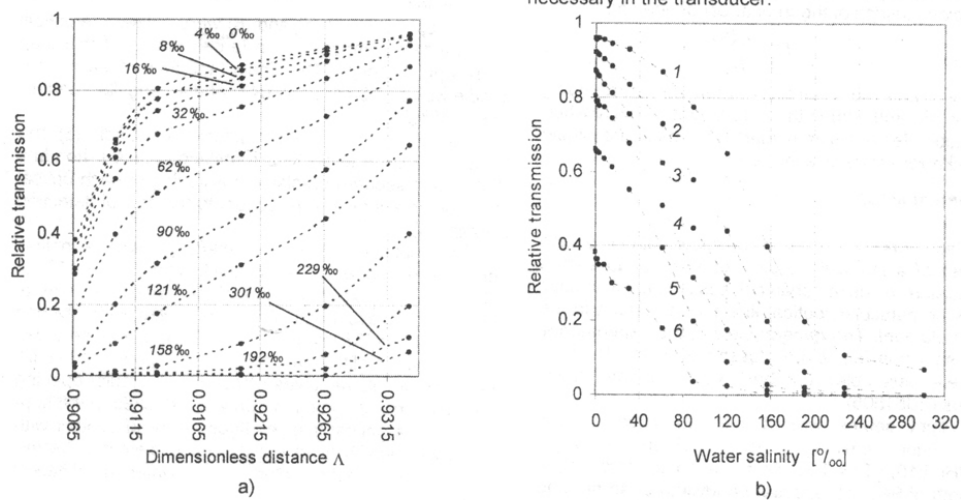


Fig. 3. Transducer relative transmission vs. the dimensionless optical fiber position Λ (a) and vs. the water salinity (b). (1) – $\Lambda=0.9333$, (2) – $\Lambda=0.9267$, (3) – $\Lambda=0.9200$, (4) – $\Lambda=0.9133$, (5) – $\Lambda=0.9100$, (6) – $\Lambda=0.9067$

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 $\Lambda=0.93\dots 0.94$ approximately. For small water salinity the optimum dimensionless distance $\Lambda=0.92\dots$, 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, and P. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element", *Optical Engineering*, vol. 41, no 4, pp. 779-786, April 2002.
- [2] B. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley and Sons, 1991, 947 p.
- [3] G. Agrawal. *Fiber-Optic Communications Systems. 3rd edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2002, 561 p.
- [4] J. Senior, *Optical Fiber Communications*, Prentice Hall International, 1985, 557 p.
- [5] G. Meteen, *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999.
- [6] H. Minamoto, Y. Kakui, A. Nishhoto, and M. Nanjo, "Remote Refractive index Difference Meter for Salinity Sensor", *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurements*, vol.38, no.2, april, pp. 608-612, 1989.
- [7] A. Iadicicco, A. Cusano, A. Cutolo, R. Bernini, and M. Giordano, "Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor", *IEEE Photonics Technology letters*, vol. 16, no. 4, pp. 1149-1151, April 2004.
- [8] J. Ding, A. Zhang, L. Shao, J. Yan, and H. Sailing, "Fiber-Taper Seeded Long-Period Grating Pair as a Highly Sensitive Refractive-Index Sensor", *IEEE Photonics Technology letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1247-1249, June 2005.
- [9] C. Ronot-Trioli, A. Trouillet, C. Veillas, and H. Gagnaire, "A Monochromatic Excitation of A Surface Plasmon Resonance In An Optical Fibre Refractive Index Sensor", *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Transducers '95*, vol. 2, June, pp. 793-796, 1995.
- [10] J. Zubia, G. Garitaonandía, and J. Arrúe, "Passive device based on plastic optical fibers to determine the indices of refraction of liquids", *Applied Optics*, vol. 39, No.6, Feb, pp. 941-946, 2000.
- [11] J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, and D. Talavera, "High Resolution Refractive Index Sensing with Cladded Multimode Tapered Optical Fibre", *IEEE Electronic Letters*, vol. 40, issue 2, January, pp. 106-107, 2004.

-
- [12] J. M. Baptista, J. L. Santos, and A. S. Lage, "Measurement of refractive index in oils using a self-referenced fiber optic intensity sensor", *Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2001*, vol. 2, November, pp. 875 - 876, 2001.
- [13] Y. Zhao, Y. Liao, B. Zhang, and S. Lai, "Monitoring technology of salinity in water with optical Fiber sensor". *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 5, May, pp. 1334-1338, 2003.
- [14] J. Graeme. *Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions*. McGraw-Hill, 1996, 276 p.
- [15] K. Ogata, *System Dynamics 4th edition*, Prentice Hall, 2003, 784 p.
- [16] L. Leupacher and A. Penzkofer, "Refractive-Index Measurement of absorbing condensed media", *Applied Optics*, no. 23, pp. 1554-1558, 1984.
- [17] S. P. F. Humphreys-Owen, "Comparison in Reflection Methods for Measuring Optical Constants without Polarimetric analysis, and proposal for new methods based on Brewster Angle", *Proceedings of Physical Society*, no. 77, pp. 949-957, 1961.
- [18] G. H. Meteen, "Refractive index errors in the critical-angle and the Brewster-angle methods applied to absorbing and heterogeneous materials", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 728-733. 1
- [19] M. Weber, *Handbook of Optical Materials*, CRC press, 2002.
- [20] G. Meteen and N. North, "Refractive index measurement of absorbing and turbid fluids by reflection near the critical angle", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 214-221, 1995.
- [21] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. Swart, "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element", *Optical Engineering*, vol. 42, no. 5, May, pp. 1383-1389, 2002.
- [22] F. Jenkins and H. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw Hill, 535 p.
- [23] J. Stone, *Radiation and Optics*, McGraw Hill, 1963, 544 p.
- [24] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics 6th ed.*, New York: Pergamon Press Ltd, 1980.