



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SENSORES REFRACTOMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA CON
ELEMENTOS DE DETECCIÓN PARABOLOIDAL Y
ELIPSOIDAL EN MODO DE REFLEXIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A
RAFAEL DÍAZ HERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS
DR. SERGIY KHOTYAINTEV

CIUDAD UNIVERSITARIA

2014

Agradecimientos

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas y permitirme cumplir este sueño que hace muchos años parecía inalcanzable.

A mis profesores, cuyas enseñanzas y sabiduría han formado al profesionalista que hoy en día pretendo ser.

A mi profesor, tutor y mentor, Dr. Sergiy Khotyaintsev, por todo el tiempo, conocimiento y empeño dedicado para la realización de este trabajo, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y mostrarme el camino para completar este proyecto

A mi profesora y compañera de laboratorio, M. I. Selene Pérez, por todas sus enseñanzas tanto dentro como fuera del salón de clases, muchas gracias por dedicarme un poco de su valioso tiempo siempre que lo necesité.

A la M. I. Amalia Castro, por apoyarme en la realización de este trabajo y aguantarme incontables horas en el laboratorio, gracias por tantos momentos amenos que compartiste a mi lado.

Al M. I. Juan González, por el apoyo brindado durante toda mi estancia en el laboratorio, muchas gracias por tu amistad.

A la DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto de investigación científica “Nuevas técnicas de monitoreo del estado físico e integridad de elementos y estructuras de diversos materiales mediante arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IN117512.

A la DGAPA-PAPIME de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Diseño de prácticas virtuales y presenciales para el mejoramiento de la enseñanza en algunas asignaturas de Ingeniería en Telecomunicaciones” con número de referencia PE104811.

A la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo en forma de Proyecto “Implementación de Fibra Óptica para la Detección de Daño en Estructuras de Concreto” patrocinado por el Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

A la DGAPA-UNAM por el apoyo económico en forma de Beca de Licenciatura por Elaboración de Tesis, PAPIIT, clave: IN117512

A la SEP, por el apoyo económico otorgado por medio de la Beca de Titulación.

A mis sinodales Ing. Gabriel A. Jaramillo Morales, Dr. Jorge Rodríguez Cuevas, M. I. Juventino Cuellar Cuevas y M. I. Selene Pérez García, por aceptar ser mi jurado y todas las correcciones hechas a este trabajo.

Dedicatorias

A mi madre

Este logro es más tuyo que mío, muchas gracias por todo tu amor, comprensión y apoyo brindado a lo largo de toda mi vida. ¡Lo logramos!

A mi padre

Donde quiera que estés, sé que estás orgulloso del hombre en el que me estoy convirtiendo, ha sido tu ejemplo el que me ha enseñado que solamente con trabajo duro se puede llegar lejos.

A Erika

Agradezco a la vida por ponerte en mi camino en el momento que más lo necesitaba. Llegaste a enseñarme a creer en mi y que no existe nada que me impida lograr lo que me proponga. Este logro no tendría sentido si no estuvieses a mi lado, en muchas ocasiones tu amor es lo único que me mantiene en pie, pues eres esa luz al final del camino. Espero sepas que todo lo que hago, lo hago en busca de un mejor futuro juntos. Te amo.

A mis hermanas

Luz, Carmen, Tere, Gaby y Nora. Se dice que no hay amor más grande que el que una madre siente por un hijo, doy gracias por tener a más de una. No hay palabras que expresen lo agradecido que me siento por tenerlas a mi lado y a pesar de que la vida haya puesto distancia entre nosotros, no hay día que no piense en ustedes.

A mis hermanos

Raúl, Arturo y Alejandro. Desde pequeño los he admirado, cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi. Es gracias a su ejemplo, apoyo y enseñanzas que hoy en día soy quien soy. Estoy seguro que sin ustedes no estaría aquí.

Marco, Ibrahim y Roberto

Porque no es necesario que seamos hijos de los mismos padres para poderlos llamar hermanos y saber que pase lo que pase siempre estarán ahí conmigo, así como yo con ustedes.

A mis niñas

Karina, Fátima, Montse, Moni, Teresita y Dany. Porque a lo largo de mi vida siempre han estado a mi lado, muchas gracias por todo el cariño y todas las risas compartidas, sin ustedes nada sería igual.

A mis pequeños amigos

Leonardo, Karol, Diego, Santiago y Alan. Con su inocencia y sonrisas me han mostrado que la vida se debe disfrutar por las cosas más simples, los quiero.

A mis cuñados

René, Roberto y Alberto. Muchas gracias por todo su apoyo y consejos, son una parte muy importante de esta familia.

A Vicky y Pao

No tengo manera de agradecerles el haberme aceptado como parte de su hermosa familia, su apoyo y cariño han sido una bendición estos últimos años.

A mi amigos

Noé Medrano, Eduardo Martínez, Jaime Hernández, Mario Tovar, César Escutia y Eduardo Mejía. Con el paso del tiempo he conocido a muchas personas, pero solo a ustedes puedo llamarlos amigos, agradezco todos esos momentos compartidos y el apoyo brindado en tiempos difíciles.

Resumen

En el presente trabajo se describe un novedoso sensor refractométrico de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal operando en modo de reflexión. Al trabajar en modo de reflexión es posible transmitir la radiación óptica hacia el elemento de detección y recibir la señal por medio de una sola fibra óptica, lo que hace posible disminuir el volumen del sensor, facilitar su implementación y reducir su costo. Los experimentos realizados se llevaron a cabo en el Laboratorio de Óptica del departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, División de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En el primer capítulo se presenta una breve introducción, se plantean las metas y objetivos de esta tesis.

En el capítulo 2 se lleva a cabo el análisis del estado del arte de los sensores refractométricos de fibra óptica, se describen los principales sensores ópticos de índice de refracción existentes.

En el capítulo 3 se presenta la evaluación teórica de los sensores utilizados en modo de transmisión. Primero se presenta una descripción del software utilizado para simular los elementos de detección, seguido de una explicación de los parámetros que representan a los sensores refractométricos. Además se describe la metodología seguida para la obtención de la ecuación cuadrática que mejor describe a los transductores. Así como los parámetros introducidos en el simulador y los resultados teóricos de la respuesta de los sensores refractométricos a diferentes parámetros.

En el capítulo 4 se describe la instalación experimental utilizada para realizar los experimentos de los sensores operando en modo de reflexión y transmisión. Además de la metodología seguida para efectuar estos experimentos.

En el capítulo 5 se presentan y discuten los resultados experimentales de los sensores ópticos operando en modo de transmisión y una comparación entre las predicciones teóricas, los resultados de los sensores operando en modo de reflexión y en modo de transmisión.

Por último, en el capítulo 6 se dan las conclusiones generales del presente trabajo.

Con esta investigación se abren nuevos horizontes en el estudio y aplicaciones de los sensores refractométricos de fibra óptica.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Metas.....	2
Capítulo 2. Análisis del Estado del Arte.....	3
2.1. Antecedentes	3
2.1.1 Reflexión interna total.....	3
2.1.2 Fibra óptica.....	4
2.2. Sensores refractométricos de fibra óptica intrínsecos.....	5
2.3. Sensores refractométricos de fibra óptica extrínsecos.....	8
2.4. Conclusiones.....	10
Capítulo 3. Evaluación Teórica de los Sensores Refractométricos de Fibra Óptica	11
3.1. Descripción de la interfaz del simulador.....	11
3.2. Parámetros de los sensores refractométricos de fibra óptica.....	12
3.3. Obtención de la ecuación de los elementos de detección.....	13
3.4. Resultados teóricos obtenidos con el simulador.....	16
3.5. Conclusiones.....	19
Capítulo 4. Estudio Experimental de los Sensores Refractométricos de Fibra Óptica	20
4.1. Instalación Experimental.....	20
4.2. Desarrollo experimental.....	27
4.3. Estudio de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal	30
4.4. Conclusiones.....	30
Capítulo 5. Resultados	31
5.1. Conclusiones.....	39
Capítulo 6. Conclusiones Generales.....	40
Referencias.....	42
Anexos.....	44

Capítulo 1

Introducción

Es muy notable el impacto que las telecomunicaciones tienen en la sociedad actual. Muchos de los aspectos sociales, económicos, educativos y culturales de un país se ven ampliamente beneficiados con su desarrollo. Sin embargo, no fue sino hasta la década de los sesentas, con la implementación de la fibra óptica como medio de transmisión, que se marcó un punto de partida para las telecomunicaciones como hoy en día las conocemos.

La inmunidad al ruido electromagnético, altas tasas de transmisión y bajo peso son algunos de los beneficios que las fibras ópticas presentan sobre otros medios de transmisión, convirtiéndola en uno de los medios de transmisión más utilizados en diferentes áreas de aplicación. A pesar de esto, utilizarlas como medio de transmisión en sistemas de comunicaciones no es su única aplicación. Además de las redes de comunicaciones, la fibra óptica es utilizada para otros fines, como la iluminación y el sensado.

Para la iluminación es empleada fibra óptica de plástico, debido a que el núcleo de ésta es relativamente grande, lo que la hace ideal para su uso con longitudes de onda en el rango visible, además de que reduce considerablemente el costo del sistema. Generalmente la iluminación es utilizada con fines decorativos o con fines de señalización pero hay sistemas que utilizan la fibra óptica para la iluminación de interiores por medio energía limpia, energía solar [1].

Otra de las aplicaciones importantes de las fibras ópticas es el área de instrumentación, específicamente en la detección de parámetro físicos, por ejemplo: temperatura, presión, intensidad luminosa, aceleración, índice de refracción, entre muchas otras. Los sensores ópticos tienen diversas ventajas sobre los sensores eléctricos o mecánicos, como son la alta sensibilidad, la inmunidad a ruido electromagnético, resistencia al deterioro ambiental, entre otras. Existen diferentes clasificaciones de los sensores ópticos, una de las más utilizadas es la clasificación dependiendo del parámetro que se modifica cuando hay algún cambio en el medio que lo rodea; en esta categoría podemos encontrar los sensores de intensidad, frecuencia, fase o polarización. Aquellos basados en la intensidad luminosa son los más simples de implementar, aludiendo a la facilidad con la que ésta puede ser detectada, lo que hace posible el uso de fibras ópticas de plástico. Otra clasificación de los sensores ópticos hace referencia al elemento de detección o transductor. Pueden ser de tipo intrínseco, es decir, el transductor es la misma fibra óptica, por lo que la perturbación del medio externo altera los parámetros ópticos dentro de la misma fibra. Por otra parte, también existen los sensores ópticos extrínsecos, aquellos en los que la perturbación del medio altera los parámetros ópticos fuera de la fibra, es decir, el elemento de detección no forma parte de la fibra óptica y puede ser de diferentes formas.

En este trabajo se presenta un sensor de índice de refracción basado en la medición de la intensidad luminosa, por medio de un elemento de detección extrínseco operando en modo de

reflexión, es decir una sola fibra será utilizada para transmitir y recibir la luz. Los transductores utilizados fueron de tipo paraboloidal y elipsoidal hechos de polimetilmetacrilato (PMMA).

Los sensores refractométricos de intensidad emplean la reflexión interna total o parcial de la luz en el transductor, misma que se ve afectada cuando el elemento de detección está en contacto con el medio externo. La reflexión interna se encuentra en función del índice de refracción externo e interno, al aumentar el índice de refracción del medio externo la reflexión interna disminuirá y por lo tanto la intensidad luminosa en el receptor también.

1.1. Objetivos

Objetivo General

- Obtener nuevos conocimientos sobre los sensores refractométricos de fibra óptica utilizando diferentes elementos de detección en modo de reflexión.

Objetivos Particulares

- Investigación teórica acerca de los sensores refractométricos de fibra óptica.
- Evaluación teórica de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección elipsoidal y paraboloidal.
- Caracterización de los sensores de fibra óptica con elementos de detección elipsoidal y paraboloidal operando en modo de transmisión
- Caracterización de los sensores de fibra óptica con elementos de detección elipsoidal y paraboloidal operando en modo de reflexión.
- Comparación entre los resultados teóricos y experimentales de los sensores en la configuración de transmisión y reflexión.
- Análisis de los resultados obtenidos

1.2. Metas

- Análisis teórico del comportamiento de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal mediante el uso del software SRFO.
- Diseño e implementación de una instalación experimental para el estudio de los sensores refractométricos de fibra óptica operando en modo de transmisión.
- Diseño e implementación de una instalación experimental para el estudio de los sensores refractométricos de fibra óptica operando en modo de reflexión.
- Proponer una metodología para la caracterización de los sensores refractométricos operando en modo de transmisión.
- Caracterización de los sensores refractométricos de fibra óptica.
- Procesamiento de los resultados experimentales y teóricos para poder realizar una comparación entre ellos.
- Analizar los resultados y discutirlos.

Capítulo 2

Análisis del Estado del Arte

La implementación de los sensores de índice de refracción de fibra óptica lleva muchos años en desarrollo. Además de ser sensores relativamente simples y baratos, son sensores de alta precisión que pueden ser utilizados para diferenciar entre varios tipos de líquidos, medidor de niveles de líquidos, medición de salinidad, además, al trabajar con luz se reduce el riesgo de ignición al tratar con sustancias inflamables como combustibles..

Existen diversos tipos de sensores refractométricos de fibra óptica, principalmente diferenciados por el elemento transductor que utilizan para detectar el medio externo. Los sensores intrínsecos son aquellos en los que el transductor es la misma fibra; los sensores de fibra óptica doblada o en forma de U, sensores de fibra óptica con punta recta o de forma especial, sensores de fibra óptica estrecha y sensores de fibra óptica con rejillas de periodo largo, son algunos ejemplos de este tipo de sensores.

Por otro lado se encuentran los sensores refractométricos extrínsecos, en los cuales generalmente se utilizan dos fibras ópticas, una para transmitir y otra para recibir. El acoplamiento entre éstas, se da por el elemento transductor. Los elementos transductores pueden ser de diferentes formas, semiesféricos, paraboloidales, elipsoidales semicilíndricos, entre otros.

2.1. Antecedentes

Es importante definir dos conceptos fundamentales para el estudio de los sensores ópticos. El primero de ellos es la reflexión interna total, ya que mediante éste se explica el principio de operación de los sensores ópticos de intensidad y de las fibras ópticas. El segundo concepto importante es el de la misma fibra óptica, ya que en ellas están basadas todos los sensores ópticos aquí presentados.

2.1.1. Reflexión interna total

Para definir este concepto suponemos un rayo de luz que viaja por un medio con índice de refracción n_1 , al llegar a la frontera con otro material de índice de refracción n_2 , $n_1 > n_2$, una parte del rayo es reflejado hacia el primer medio y el resto sufre un refracción al entrar al segundo, como se muestra en la figura 2.1 (a). La ley de la reflexión, nos dice que: el ángulo, con respecto a la normal, con el cual incide la luz en la interfaz entre dos materiales, es igual al ángulo creado por el rayo reflejado con la misma interfaz. La refracción se debe a la diferencia en la velocidad de la luz en dos materiales con índices de refracción diferentes.

La relación que describe la refracción en la interfaz entre dos materiales que transmiten luz, está dada por: $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$, llamada Ley de Snell.

Cuando la luz que viaja hacia un material con índice de refracción mayor, es reflejada, el proceso es conocido como reflexión externa. Por otra parte, cuando la luz que viaja por cierto medio, es reflejada por otro material con índice de refracción menor, es conocido como reflexión interna.

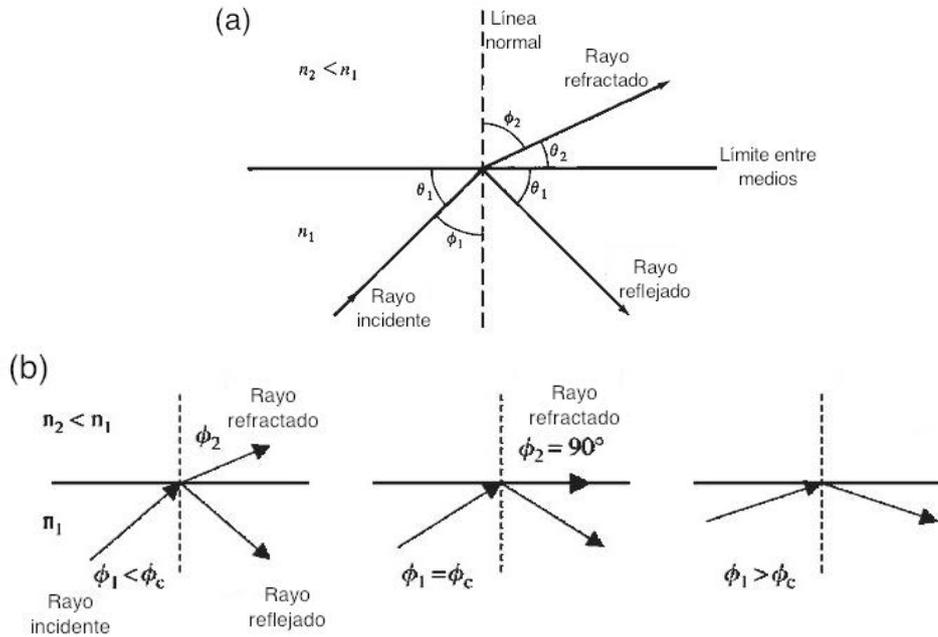


Figura 2.1. (a) Reflexión y refracción de un rayo de luz en la interfaz de dos materiales, (b) representación del ángulo crítico y reflexión interna total en una interfaz vidrio-aire[2].

A medida que el ángulo del rayo incidente, ϕ_1 , se vuelve mayor, el ángulo refractado, ϕ_2 , se aproxima a 90° , como se muestra en la figura 2.1 (b), donde se aprecia un rayo de luz que viaja en un vidrio hacia el aire. Más allá de este punto, no existe refracción en el material contiguo, y el rayo de luz sufre reflexión interna total. Si el ángulo de incidencia ϕ_1 es incrementado, eventualmente el rayo refractado alcanzará un valor donde el rayo de luz en el aire es paralelo a la superficie del vidrio. Este punto es conocida como ángulo crítico de incidencia ϕ_c . Cuando ϕ_1 es mayor que ϕ_c , la condición de reflexión interna total se satisface; esto es, la luz es totalmente reflejada dentro del vidrio cuando no hay luz escapándose de la superficie del vidrio [2].

Por lo que para que sea posible la reflexión interna total en cierto material se deben cumplir dos condiciones. El índice de refracción del medio por el que se propaga la luz debe ser mayor que el del medio contiguo. Por otra parte el ángulo que forma el rayo incidente con la recta normal a la interfaz entre los dos materiales, debe ser mayor al ángulo crítico ϕ_c .

2.1.2 Fibra óptica

En su forma más básica una fibra óptica está conformada por un núcleo, cilíndrico de vidrio o plástico, de índice de refracción n_1 , coaxial a un revestimiento, también cilíndrico de vidrio o plástico, de índice de refracción n_2 . Rodeándolos se encuentra un *buffer* de polímero que sirve para proteger la fibra de efectos mecánicos y ambientales. La figura 2.2 (a) muestra un esquema de un corte transversal y longitudinal de la estructura básica de la fibra óptica.

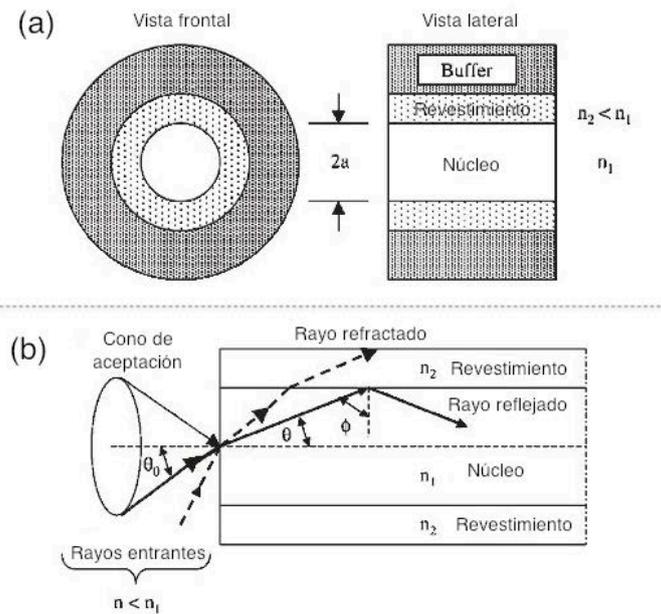


Figura 2.2. (a) Esquema de un corte transversal y longitudinal de la fibra óptica. (b) Diagrama del comportamiento de la luz dentro de la fibra óptica [2].

Supongamos el caso en que el diámetro de la fibra es mucho más grande que la longitud de onda de la luz, de esta forma será posible explicar el comportamiento de la fibra por medio de óptica geométrica, usando el concepto de rayos de luz. En la figura 2.2 (b) se muestra un rayo de luz, con línea continua, entrando al núcleo de la fibra desde un medio con índice de refracción n , que es menor que el índice n_1 del núcleo. La luz incide en la superficie frontal con un ángulo θ_0 con respecto del eje de la fibra y es refractado dentro del núcleo, este ángulo se encuentra dentro de un rango llamado cono de aceptación. Dentro del núcleo, el rayo incide en la interfaz núcleo-revestimiento con un ángulo ϕ mayor al ángulo crítico, ϕ_c , con respecto de la normal. Si estas condiciones se cumplen, entonces la luz sufre reflexión interna total, y la luz sigue un camino a lo largo del núcleo de la fibra en forma de zigzag.

En cambio si el rayo de luz incide en la parte frontal de la fibra con un ángulo θ_0 mayor al cono de aceptación, como el rayo en línea discontinua mostrado en la figura 2.2 (b), el rayo de luz es refractado dentro del núcleo pero al incidir en la interfaz núcleo-revestimiento, lo hará con un ángulo ϕ menor al ángulo crítico ϕ_c por lo que no habrá reflexión interna total dentro del núcleo de la fibra y parte del rayo de luz se refractará en el revestimiento y se perderá [2].

2.2. Sensores refractométricos de fibra óptica intrínsecos

Sensor de índice de refracción fibra óptica doblada o en forma de U

Los sensores de índice de refracción de fibra óptica doblada o en forma de U [3-6], son sensores de intensidad que aprovechan la reflexión interna total. En estos sensores el revestimiento de la fibra es removido a lo largo de una cierta longitud dejando el núcleo expuesto. La fibra es doblada en forma de U a lo largo de la parte descubierta, tal como se muestra en la figura 2.3. Asumiendo que ϕ es el ángulo de incidencia y ϕ_c el ángulo crítico en la interfaz núcleo-medio circundante, el rayo de luz experimentará reflexión interna total siempre y cuando $\phi > \phi_c$, en caso contrario la mayoría de la potencia óptica se pierde en el medio externo. Como el ángulo crítico está dado por la expresión $\phi_c = \sin^{-1} \frac{n_m}{n_c}$, donde n_m es el índice de refracción del medio externo y n_c es el índice de refracción del núcleo de la fibra, la potencia óptica de salida está en función del índice de refracción del medio circundante [3].

Estos sensores son realizados principalmente con fibras ópticas de plástico debido a su bajo precio, núcleo de gran diámetro y gran apertura numérica. La exposición del núcleo generalmente se logra mediante técnicas de pulido. Son utilizadas como refractómetros o detectores de nivel de líquidos.

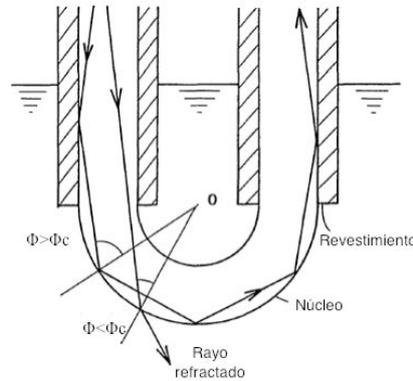


Figura 2.3. Estructura y principio de operación del refractómetro de fibra óptica en forma de U [3].

Refractómetros de fibra óptica con punta recta o de forma especial

Otro tipo de sensor refractométrico intrínseco es aquel en el que la punta de la fibra es utilizada como elemento transductor, estos sensores trabajan en modo de reflexión [7-8]. El sistema de sensado, mostrado en la figura 2.4, es utilizado para medir el índice de refracción de materiales líquidos. El sensor es una fibra óptica monomodo sumergida en el líquido de interés. Haciendo incidir un haz de luz en la fibra y midiendo la reflexión de la interfaz líquido-material, es posible determinar el índice de refracción. En la figura 2.4 podemos observar un diagrama esquemático del sistema utilizado para este sensor. Un láser de helio-neón, transmite un haz hacia un divisor de haz, el haz es modulado en amplitud por una hélice mecánica. La luz modulada es acoplada hacia la fibra óptica, utilizando una lente microscópica de enfoque y monturas de alineamiento comerciales. La luz incidente es transmitida varios metros por la fibra para salir por la punta del otro extremo de la fibra, misma que se encuentra sumergida en la muestra. La luz reflejada por la interfaz líquido-fibra regresa dentro de la fibra y emerge por la punta de entrada de la fibra. Esta luz reflejada es transmitida hacia fuera del puerto lateral del divisor de haz y es espacialmente filtrada por una abertura, para discriminar de reflexiones parásitas. Un filtro óptico es utilizado para rechazar la luz ambiental y así la señal transmitida es detectada por un fotodiodo [7]. Un sistema similar que utiliza una punta semiesférica, es descrito para su utilización como medidor de nivel de líquidos [8].

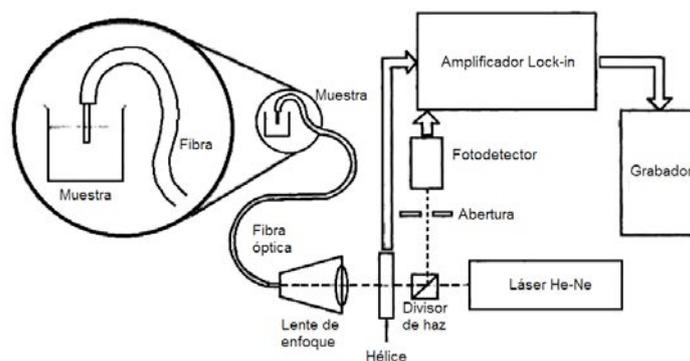


Figura 2.4. Diagrama esquemático del sistema de sensado refractométrico de fibra óptica [7].

Sensor refractométrico de fibra óptica en forma D

La implementación de este tipo de sensores se lleva a cabo con una fibra monomodo a la cual se le reduce el espesor del revestimiento, tal como se muestra en la figura 2.5, el espesor del revestimiento se reduce, en una de sus caras, en menos de 10 μm , lo que permite que un segundo revestimiento, medio externo, entre en contacto con el primero, lo que conduce a que, en la región que está en contacto, el modo fundamental de la fibra se vea afectado. En particular, si el índice de refracción del segundo revestimiento es menor que el índice efectivo del modo, la fibra continúa conduciendo la luz. Sin embargo, si el índice de refracción del segundo revestimiento es mayor que el índice efectivo, la potencia en la fibra se atenúa [9].

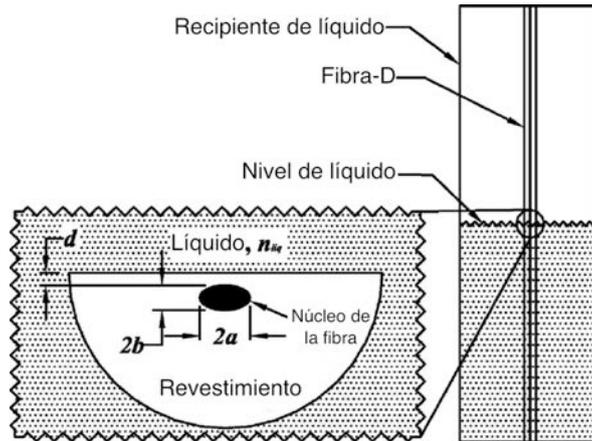


Figura 2.5. Diagrama esquemático del sistema de sensado de nivel de líquido de fibra óptica en forma D[9].

Sensores refractométricos de fibra óptica estrecha

Los sensores de índice de refracción de fibra óptica estrecha basan su funcionamiento en la interferencia modal entre el núcleo y el revestimiento a lo largo de una región estrecha. Estos sensores de índice de refracción de interferencia multimodal operan con un micro ensanchamiento en una fibra monomodo. La estructura a considerar, consiste de una región uniformemente adelgazada entre dos regiones cónicas, ver figura 2.6, donde el núcleo original se encuentra virtualmente ausente y los modos son soportados por la región revestimiento-medio. Dentro de la primera región cónica, el núcleo gradualmente se extiende, lo que conlleva a una ampliación espacial del modo del núcleo, que eventualmente acoplará su potencia a los modos del revestimiento en la región adelgazada. Los modos del revestimiento crean una diferencia de fase mientras viajan a través de la fibra. En la segunda región cónica, estos modos del revestimiento, junto con sus fases, gradualmente se acoplan hacia el modo núcleo de la fibra monomodo, llevando a una distribución de potencia espectral periódica. Midiendo el desplazamiento espectral debido al cambio de índice de refracción del medio, se pueden cuantificar los cambios de índice de refracción. Las áreas cónicas y el adelgazamiento de la fibra es logrado con técnicas de calentamiento, estiramiento y pulido de precisión [10].

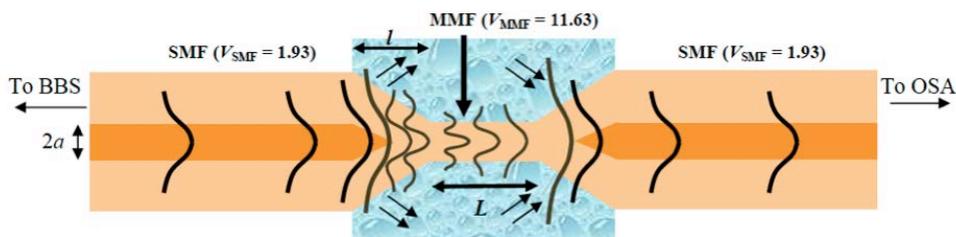


Figura 2.6. Diagrama esquemático del sensor refractométrico de fibra estrecha [10].

Sensor de índice de refracción óptico de rejillas de periodo largo

Otro tipo de sensor refractométrico existente es el que opera con rejillas de periodo largo [11-13]. En la figura 2.7 se puede observar un diagrama del funcionamiento de este sensor. Una onda de luz se propaga desde una fuente óptica de banda ancha, por ejemplo un diodo emisor de luz súper luminiscente, hacia el puerto 1, P_1 , del circulador óptico, viaja por el circulador hacia el puerto 2, P_2 , y se propaga a través de la fibra óptica hacia la rejilla de periodo largo (LPG por su siglas en inglés *Long Period Gratings*). Una parte de la onda continúa propagándose por el núcleo de la fibra hacia el espejo localizado al final de la fibra, otra parte de la onda viaja a través del revestimiento, como un único modo del revestimiento, de igual manera dirigida hacia el espejo. Debido al espejo, la onda es reflejada hacia la rejilla de periodo largo. En la rejilla, parte de la onda que viaja en el núcleo se acopla en el revestimiento y es perdida. Similarmente parte de la onda que viaja en el revestimiento se acopla de regreso en el núcleo, mientras el resto del modo del revestimiento continúa propagándose por el revestimiento y también se pierde. Las dos ondas que viajan por el núcleo hacia el puerto 2 del circulador interfieren entre ellas. Esta interferencia entre ondas se propaga por el circulador y sale por el puerto tres, P_3 . Un analizador de espectros óptico determina el espectro del patrón de interferencia como función de la longitud de onda. Cuando hay un cambio en el medio de refracción externo, la diferencia de fase también variará y por lo tanto su longitud de onda [11].

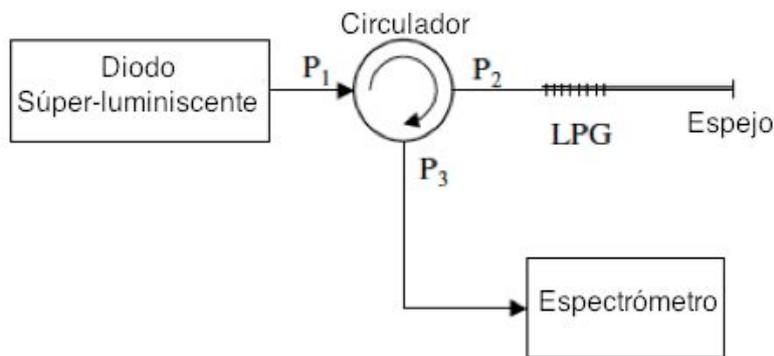


Figura 2.7. Diagrama del sensor refractométrico óptico de rejillas de periodo largo [11].

2.3. Sensores refractométricos de fibra óptica extrínsecos

Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección semiesférico, semicilíndrico, paraboloidal y elipsoidal, trabajando en modo de transmisión

En esencia, el principio de operación de este tipo de sensores es el mismo. Lo que varía es la forma del elemento de detección utilizado para acoplar la fibra transmisora con la receptora, lo que implica que también cambiará la respuesta del sensor [19].

La operación básica del sensor se puede explicar como se describe a continuación: un haz de luz, proveniente de una fuente luminosa, se acopla a la fibra óptica transmisora y es llevado hacia el elemento de detección. Dependiendo del índice de refracción del medio externo y de la posición relativa de las fibras, la luz podrá experimentar reflexión interna total, parcial o nula dentro del mismo. De existir reflexión interna, la luz será acoplada a la fibra óptica receptora para ser detectada por un fotodetector.

Este tipo de sensores son de intensidad, la potencia luminosa de la fibra de salida cambia en función del índice de refracción del medio externo que está en contacto con el elemento

transductor. Esto se debe a que el acoplamiento entre las fibras por medio del elemento de detección se da gracias a la reflexión interna total o parcial dentro del mismo. Si el medio externo es aire, el índice de refracción externo es mucho menor que el del elemento transductor por lo que habrá reflexión interna total y existirá acoplamiento entre las fibras por lo que gran parte de la potencia luminosa de la fibra óptica transmisora entrará a la fibra óptica receptora. Cuando el elemento de detección se encuentra sumergido en algún líquido, el índice de refracción del medio externo se vuelve comparable con el del elemento transductor, por lo que la potencia óptica a la entrada de la fibra receptora disminuirá o desaparecerá por completo.

La figura 2.8 muestra un diagrama del elemento transductor semicilíndrico [14-16]. En ésta podemos observar que existen varios parámetros de diseño, como es la distancia de las fibras al centro del elemento, L , diámetro del núcleo de las fibras, D y el radio interno y externo del elemento transductor, R_1 y R_2 , respectivamente. Estos parámetros serán los que marcan las diferentes características del sensor, tales como sensibilidad, rango de detección y respuesta con respecto de la distancia relativa de las fibras. Otros parámetros importantes en la respuesta del sensor, no mostrados en la figura, son la apertura numérica de la fibra, AN , y su perfil, gradual o escalonado.

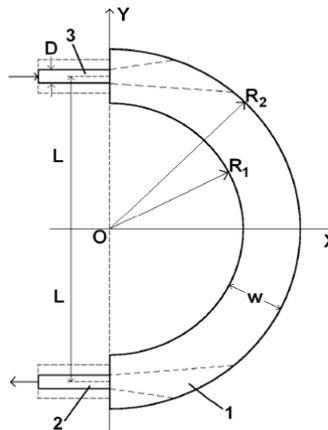


Figura 2.8. Diagrama del sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección semicilíndrico[14].

En la figura 2.9 podemos observar otros elementos de detección [17-21], (A) semiesférico, (B) paraboloidal y (C) elipsoidal. Igual que en el caso anterior existen diferentes parámetros de diseño, muy parecidos a los anteriores. Distancia de la fibra al centro del elemento (L), diámetro del núcleo de la fibra (D) y radio del elemento (R). Para el caso de los elementos de detección elipsoidales y paraboloidales también es posible cambiar la ecuación que describe al elemento, lo que afectará notablemente la respuesta del sensor [19].

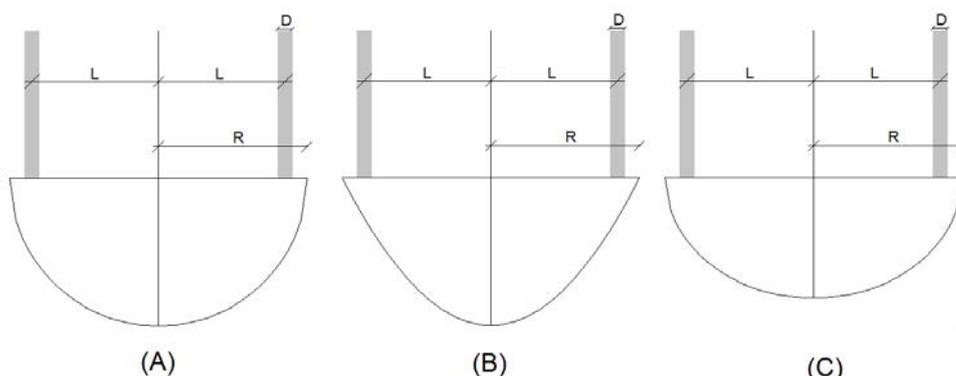


Figura 2.9. Diagrama de los elementos de detección (A) semiesférico, (B) paraboloidal y (C) elipsoidal

Además de ser utilizados como sensores de índice de refracción [17], la aplicación de estos sensores es amplia, se ha probado su utilidad como medidores de nivel de líquido de nitrógeno [20], para monitorizar el rendimiento del separador de gas propelente en un propulsor de naves espaciales [18] y para medir la concentración de salinidad [21].

Sensor de índice de refracción basado en la interferencia multimodo en una estructura monomodo-multimodo-monomodo

Estos sensores están basados en la interferencia multimodal operando en una estructura de fibra óptica monomodo-multimodo-monomodo (SMS por sus siglas en inglés *Singlemode-Monomode-Singlemode*). Consiste en una sección de fibra multimodo empalmada entre dos secciones de fibras monomodo, formando una estructura SMS. La luz proveniente de la fibra monomodo excita muchos modos en la sección de la fibra multimodo, lo que causa interferencia entre ellos a lo largo de la fibra. El efecto autoimagen ocurre cuando los modos excitados en la fibra óptica multimodo reconstruye la intensidad y fase de la señal de entrada. Para el sensado de índices de refracción con estructuras SMS se observa el cambio del espectro transmitido cuando el índice de refracción externo se cambia [22]. La figura 2.10, muestra un diagrama esquemático de una estructura SMS.

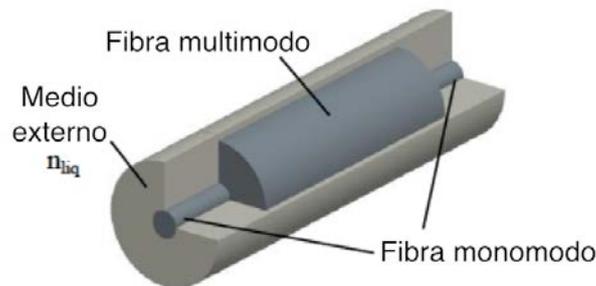


Figura 2.10. Diagrama esquemático del sensor refractométrico con estructura monomodo-multimodo-monomodo [22].

2.4. Conclusiones

En la actualidad existe una gran cantidad de sensores refractométricos de fibra óptica que emplean diferentes principios. Sin embargo, los de intensidad son los más sencillos, comunes y baratos de implementar. Dentro de éstos, los extrínsecos son de gran interés debido al amplio rango de índices de refracción al que son sensibles, además de que no es necesario un tratamiento especial de la fibra óptica.

Los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal, elipsoidal y semiesférico han sido estudiados, pero su funcionamiento y características todavía requieren de una investigación más profunda. En particular, nunca fue realizado un estudio de estos sensores en el modo de reflexión. Es por ello que en este trabajo se hace una investigación teórica y experimental de los sensores en cuestión tanto en el modo de transmisión como en modo de reflexión, con un enfoque especial al modo de reflexión, debido a las ventajas de utilizar una sola fibra óptica para transmitir la radiación óptica hacia el sensor y recibir la señal por medio de la misma fibra óptica.

Evaluación Teórica de los Sensores Refractométricos de Fibra Óptica en Modo de Reflexión

Con la finalidad de contar con resultados teóricos que predigan el comportamiento de los elementos de detección, dos paraboloidales y dos elipsoidales, se utilizó un software que emplea el método de trazado de rayos llamado SRFO [23]. Dicho programa sirve para simular sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección que obedezcan a una ecuación de segundo grado trabajando en modo de transmisión, no es capaz de trabajar en modo de reflexión, pero se espera que los resultados obtenidos sean útiles.

3.1. Descripción de la interfaz del simulador

Como ya se mencionó anteriormente para obtener valores teóricos se hizo uso de un software que emplea el método de trazado de rayos llamado SRFO, con este software fue posible obtener una serie de valores teóricos para caracterizar los elementos de detección utilizados en los sensores. La figura 3.1 es una impresión de pantalla de la interfaz de usuario del software.

En la parte superior de la interfaz es posible observar un campo destinado a ingresar la ecuación del elemento de detección. También se puede apreciar un campo para la fibra emisora y otro para la fibra receptora, en éstos se puede establecer la apertura numérica de las fibras, la posición relativa, el perfil (gradual o escalonado) y diámetro relativo con respecto del radio del elemento. Por otra parte, en el apartado denominado como general se puede introducir el índice de refracción del elemento de detección, el cual se supone igual al de las fibras, el intervalo de índices de refracción para el cual se va a analizar el sensor, los pasos que se darán en ese intervalo, el número de rayos que se utilizarán y la cantidad de reflexiones máximas.

Una vez introducidos todos los parámetros para simular, en el botón denominado como configuración, se designará la ruta en la que se guardarán una serie de archivos con los resultados del simulador. Se genera un archivo con extensión .psr que contiene la transmisión absoluta del sensor a un determinado índice de refracción. Otro tipo de archivos son guardados con coordenadas del rayo de salida, así como archivos de ángulos y coordenadas de intersecciones de los rayos con la superficie de trabajo, utilizados para trazar la gráfica de los resultados.

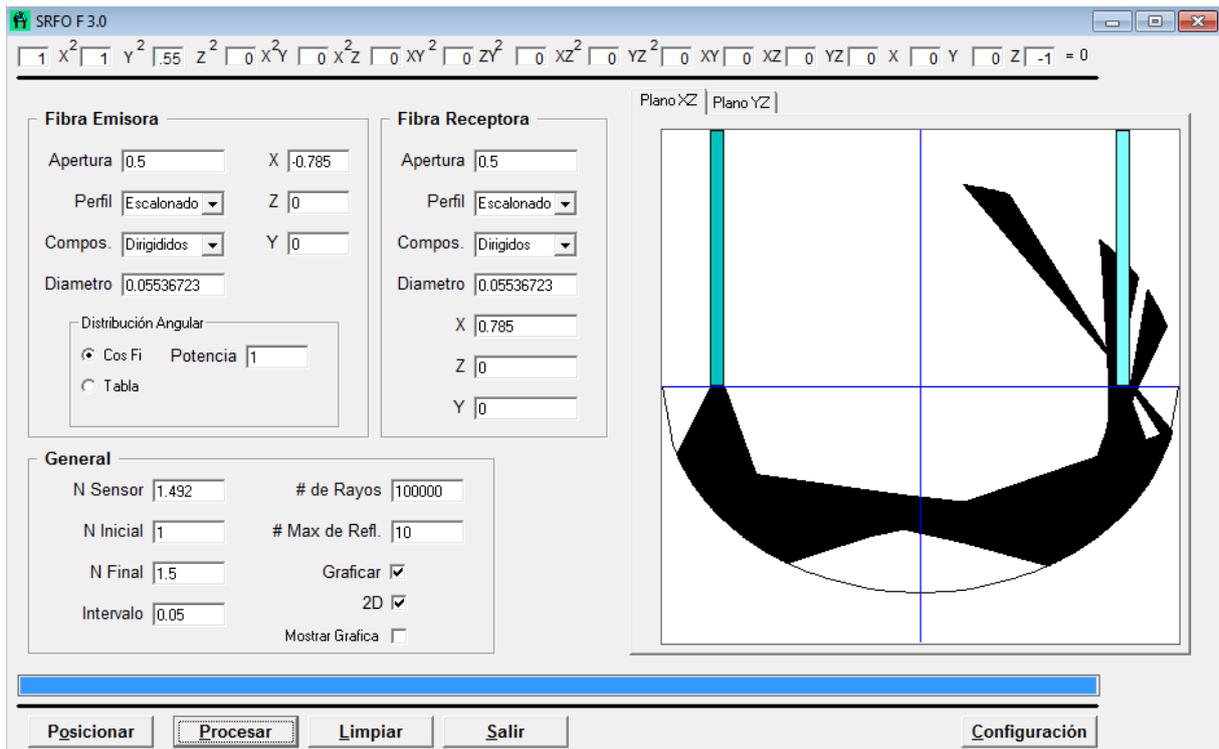


Figura 3.1. Interfaz de usuario del simulador.

3.2. Parámetros de los sensores refractométricos de fibra óptica

Las características de propagación de un sensor refractométrico de fibra óptica dependen del tamaño de las partes que lo conforman, elementos de detección y fibras ópticas [19], por lo que es necesario definir algunos parámetros. Es conveniente utilizar medidas adimensionales para definir al sensor, de esta manera la respuesta de éstos será conservada sin importar el tamaño.

La figura 3.2 muestra un esquema del sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección semiesférico operando en modo de transmisión, en ésta podemos observar las dimensiones físicas importantes: el radio del sensor R, el diámetro del núcleo de la fibra, D, y la distancia del centro del elemento al centro de la fibra, L.

El diámetro del núcleo de las fibras y el radio del sensor, son parámetros fundamentales, ya que pueden variar de un sensor a otro, lo que nos lleva a la definición de diámetro relativo, ϕ , como la relación entre el diámetro del núcleo de la fibra D y el radio del elemento R, ecuación 3.1.

$$\phi = \frac{D}{R} \quad (3.1)$$

Otro parámetro fundamental es la separación que hay entre la fibra y el centro del elemento por lo que se definirá la distancia relativa, Λ , como la relación existente entre la distancia del centro de la fibra al centro del elemento, L, y el radio del sensor R, ecuación 3.2 [17].

$$\Lambda = \frac{L}{R} \quad (3.2)$$

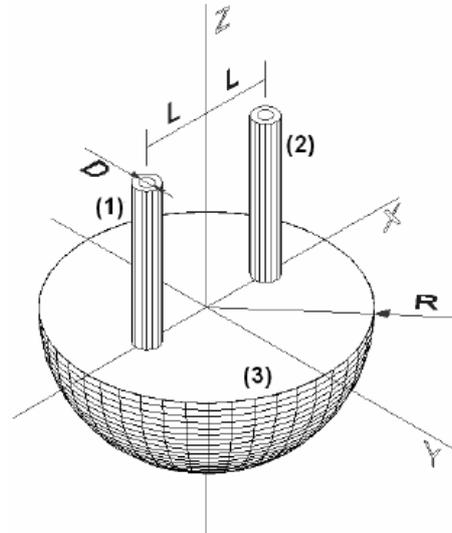


Figura 3.2. Esquema del sensor refractométrico de fibra óptica operando en modo de transmisión, (1) fibra óptica transmisora, (2) fibra óptica receptora, (3) elemento de detección semiesférico [24].

Para poder entender los resultados arrojados por el simulador es necesario conocer la definición de ciertos conceptos como transmisión relativa y absoluta. Como se puede observar en la figura 3.2, existen varios acoplamientos que tienden a presentar atenuaciones ópticas, dichas atenuaciones son independientes del comportamiento del sensor en presencia del medio con índice de refracción n . Es por esto que se define la cantidad llamada transmisión absoluta, T , como la relación entre intensidad óptica de salida, $I_2(n)$, y la intensidad óptica de entrada, I_1 , en el elemento de detección, ecuación 3.3.

$$T = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (3.3)$$

En la práctica la única intensidad que es posible medir es la intensidad óptica que incide en el fotodetector, por lo que se define la transmisión relativa (al aire) como la relación entre la intensidad óptica de salida a determinado índice de refracción y la intensidad óptica de salida en el aire, ecuación 3.4 [17].

$$T^* = \frac{I_2(n)}{I_2(\text{aire})} \quad (3.4)$$

3.3. Obtención de la ecuación de los elementos de detección

Para poder simular el comportamiento de los sensores, es necesario conocer una ecuación de segundo grado que represente a los elementos de detección. Estos elementos se elaboraron en un proyecto anterior [25] con barras de acrílico de diferentes diámetros en un torno de control numérico. Las ecuaciones 3.4 y 3.5 son las ecuaciones teóricas normalizadas que deberían describir a los elementos de detección elipsoidales y paraboloidales, respectivamente, sin importar el tamaño de éstos.

$$x^2 + y^2 + 0.746z^2 = 1 \quad (3.5)$$

$$x^2 + y^2 - z = 1 \quad (3.6)$$

Antes de introducir estos datos en el simulador fue necesario comprobar que realmente los elementos de detección obedecieran estas ecuaciones. Para esto se tomó una serie de fotografías, que posteriormente se imprimieron, con la finalidad de poder copiar la forma de los elementos de detección en hojas de papel milimétrico, y así obtener una serie de pares ordenados que describieran a cada uno de ellos. La figura 3.3 muestra los elementos de detección utilizados.

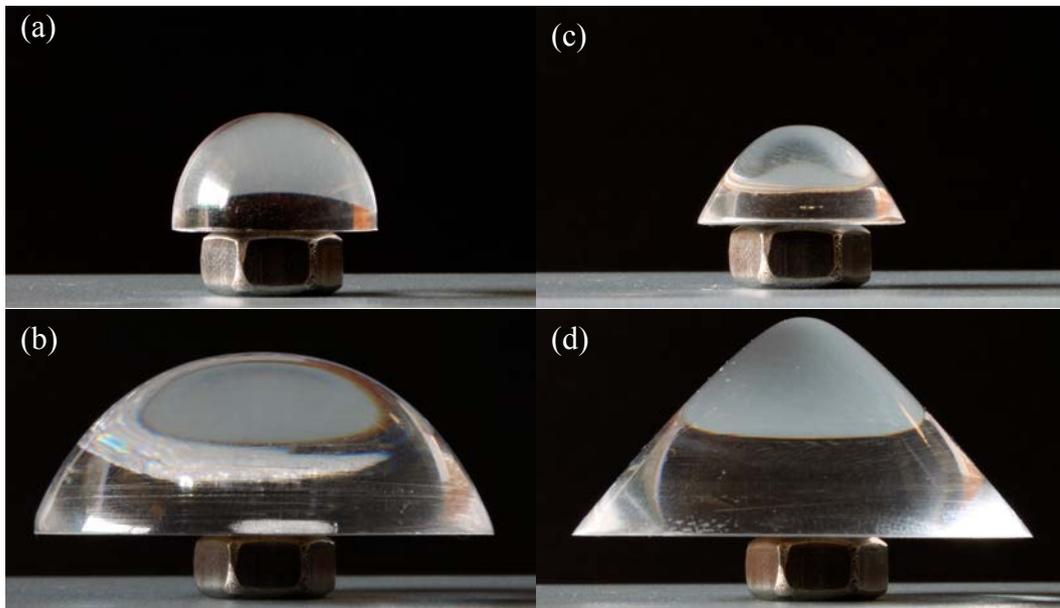


Figura 3.3. Fotografías de los elementos de detección para la obtención de su ecuación. (a) elipsoidal $R=0.785$ [cm], (b) elipsoidal $R=1.77$ [cm], (c) paraboloidal $R=0.795$ [cm], (d) paraboloidal $R=1.755$ [cm].

Los pares ordenados obtenidos a partir de las fotografías con el papel milimétrico fueron introducidos en Matlab y dibujados para compararlos con las ecuaciones teóricas. En la figura 3.4 podemos observar con línea discontinua la gráfica teórica de los elementos en el plano XZ y con línea continua la gráfica real de cada uno de los elementos de detección obtenidas a partir de las fotos.

Se puede notar que solamente en los elementos pequeños, gráfica A y C, se tiene una buena aproximación. En las gráficas B y D, correspondientes a los elementos más grandes, se aprecia que las ecuaciones teóricas no se asemejan a las figuras reales por lo que no es posible ocupar estas ecuaciones en el simulador. Lo más probable es que estas diferencias se deban a la técnica de pulido utilizada.

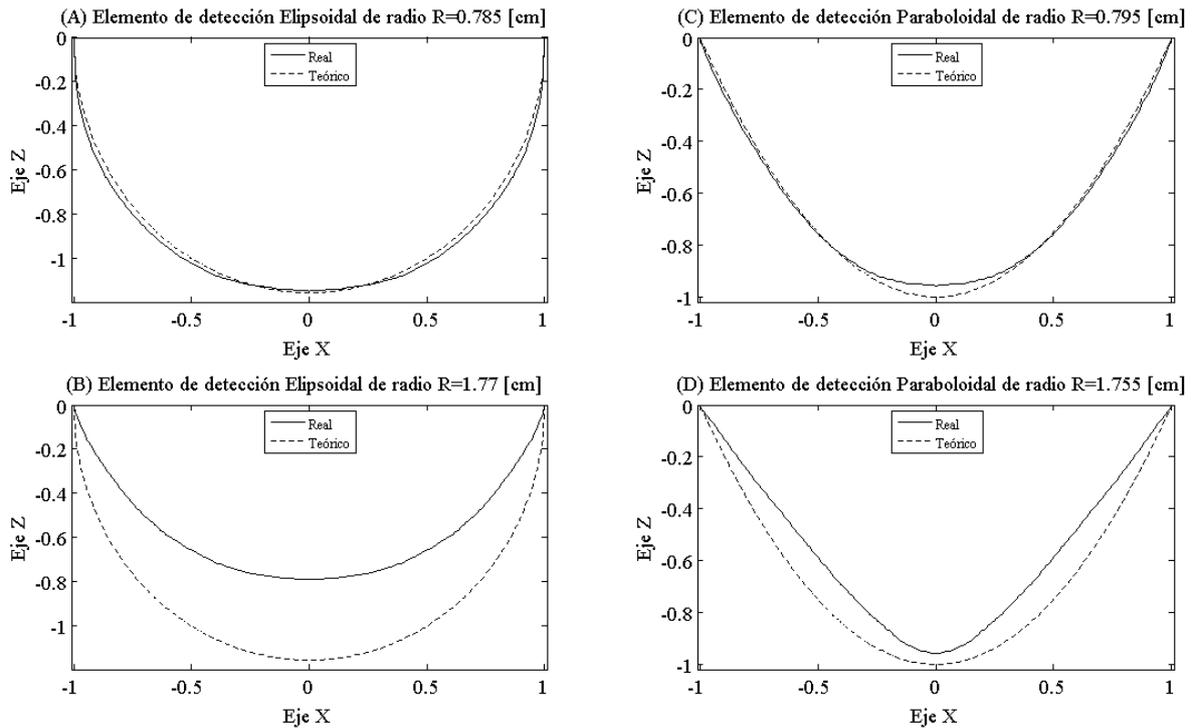


Figura 3.4. Gráfica comparativa entre los elementos de detección teóricos y reales. (A) Elipsoidal $R=0.785[cm]$, (B) Elipsoidal $R=1.77 [cm]$, (C) Paraboloidal $R=0.795 [cm]$, (D) Paraboloidal $R=1.755 [cm]$.

Debido a que el simulador solamente acepta ecuaciones de segundo orden, se buscaron ecuaciones tales que las curvas tuvieran la mejor coincidencia en el área donde ocurren las reflexiones con mayor transmisión para los elementos de detección paraboloidal de radio $R=1.755 [cm]$ y elipsoidal de radio $R=1.77 [cm]$. La figura 3.5 muestra las curvas que se aproximan, línea discontinua, a los elementos de detección reales, línea continua.

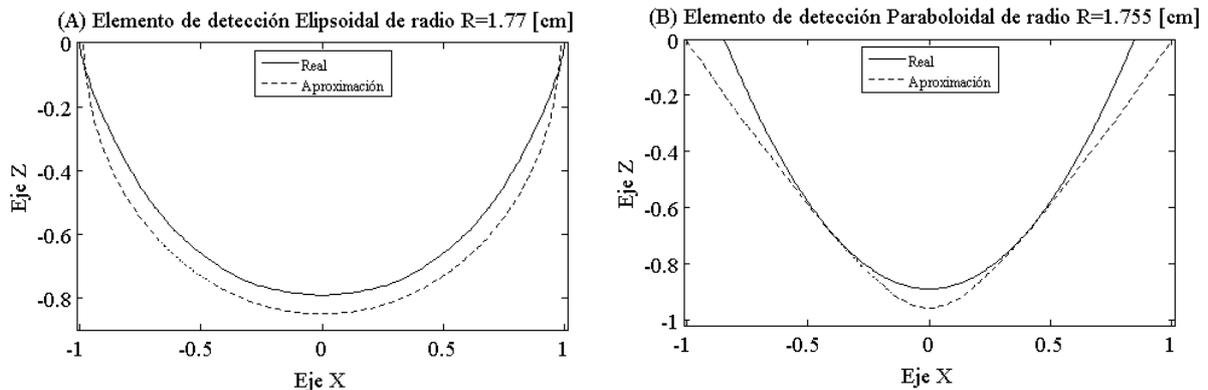


Figura 3.5. Gráfica comparativa entre los elementos de detección aproximados y reales. (A) Elipsoidal $R=1.77 [cm]$, (B) Paraboloidal $R=1.755 [cm]$.

La ecuación 3.7 es la utilizada para aproximar el elemento de detección elipsoidal, mientras que la 3.8 es la que aproxima al elemento de detección paraboloidal.

$$0.92x^2 + 0.92y^2 + 1.12z^2 = 0.81 \tag{3.7}$$

$$1.25x^2 + 1.25y^2 - z = 0.89 \tag{3.8}$$

3.4. Resultados teóricos obtenidos con el simulador

Las simulaciones realizadas se efectuaron variando la distancia relativa de ambas fibras en el eje x, a pasos de 0.005 desde el punto más alejado al centro posible, este punto no fue el mismo para los cuatro elementos, debido a que el simulador no permite que alguna parte de la fibra óptica emisora transmita luz fuera del elemento de detección. Por ejemplo, para una distancia relativa de 1, la mitad de la fibra óptica estaría transmitiendo hacia el elemento de detección y la otra mitad hacia fuera, lo que no es posible simular, es por esto que las gráficas de las simulaciones, presentadas más adelante parecen incompletas.

Las ecuaciones 3.5 y 3.6, fueron las que se utilizaron por simulador para describir los elementos de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm] y paraboloidal de radio $R=0.795$ [cm], respectivamente. Para describir al elemento de detección elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm] se utilizó la ecuación 3.7 para la tercera ventana transmisión y la 3.5 para las dos primeras ventanas de transmisión debido a la carencia de una ecuación de segundo grado que describiera correctamente al elemento. De igual manera para el elemento de detección paraboloidal de radio $R=1.755$ [cm] se utilizó la ecuación 3.8 para la segunda ventana de transmisión y la 3.6 para la primera ventana de transmisión por la misma razón.

El resto de los parámetros establecidos en el simulador para la simulación se presentan a continuación

N sensor = 1.492
 # de Rayos= 100000
 # Máx. de Refl = 10
 Apertura = 0.5
 Perfil: escalonado
 Diámetro:

Elemento de detección	Diámetro ϕ
Elipsoidal $R=0.785$ [cm]	0.12480764
Elipsoidal $R=1.77$ [cm]	0.05536723
Paraboloidal $R=0.795$ [cm]	0.12327044
Paraboloidal $R=1.755$ [cm]	0.05584045

Tabla 3.1 Diámetros adimensionales Φ de los elementos de detección.

En la figura 3.6, se puede observar una gráfica de la respuesta teórica a diferentes distancias relativas con aire como medio externo, índice de refracción $n=1$, del elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm]. Es posible observar la existencia de tres ventanas de transmisión teóricas, pero la tercera ventana no es posible definir su posición exacta debido a que se encuentra en un punto donde parte de la fibra transmite fuera del elemento de detección. En la tabla 3.2 se presentan las distancias relativas a las que teóricamente se encuentran las ventanas de transmisión.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.65
2	0.87
3	No concluyente

Tabla 3.2. Distancias relativas teóricas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.12484$, en aire

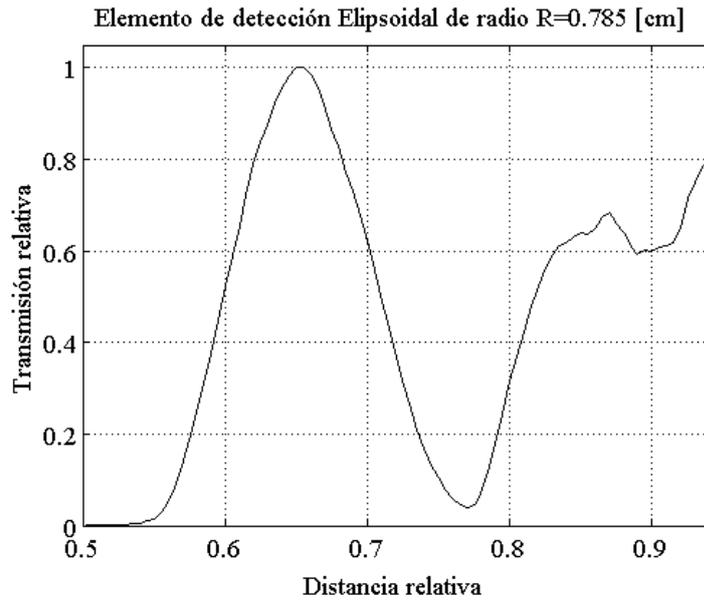


Figura 3.6. Respuesta teórica del sensor operando en modo de transmisión a diferentes distancias relativas A con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.12484$.

La figura 3.7, muestra una gráfica de la respuesta teórica a diferentes distancias relativas con aire como medio externo del elemento de detección elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm]. Es posible observar la existencia de tres ventanas de transmisión teóricas. En la tabla 3.3 se presentan las distancias relativas a las que teóricamente se encuentran las ventanas de transmisión.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.705
2	0.825
3	0.91

Tabla 3.3. Distancias relativas teóricas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.055367$, en aire

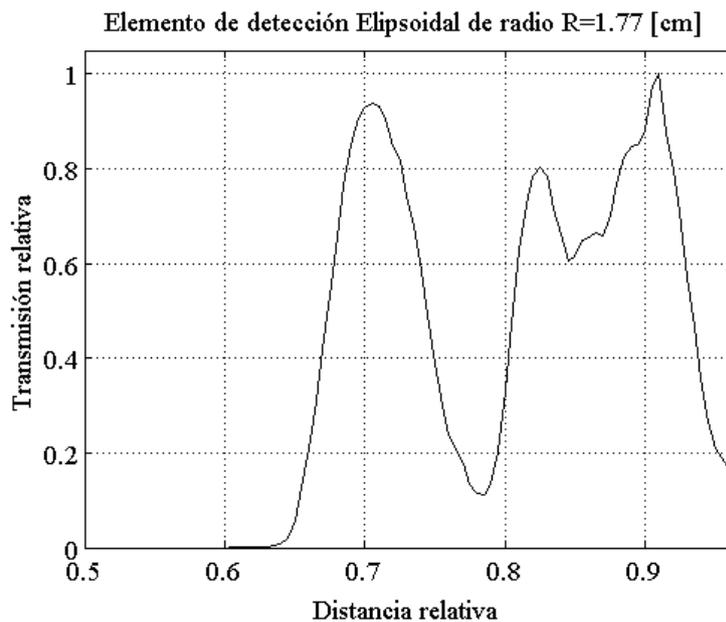


Figura 3.7. Respuesta teórica del sensor a diferentes distancias relativas A con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.055367$.

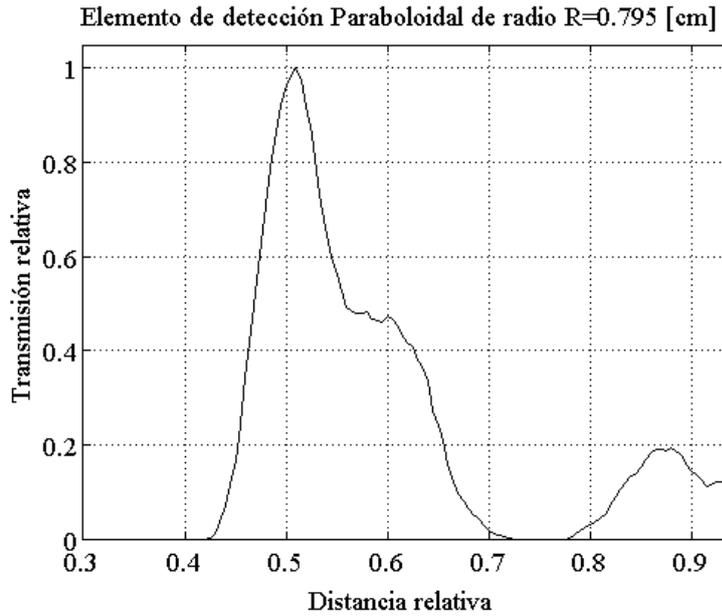


Figura 3.8. Respuesta teórica del sensor operando en modo de transmisión a diferentes distancias relativas A con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.12327$.

Una gráfica de la respuesta de la respuesta teórica a diferentes distancias relativas con aire como medio externo del elemento de detección paraboloidal de radio $R=0.795$ [cm] es mostrada en la figura 3.8. Podemos observar las distancias relativas a las que se encuentran tres ventanas de transmisión teóricas, presentadas en la tabla 3.4.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.53
2	0.6
3	0.895

Tabla 3.4. Distancias relativas teóricas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección paraboloidal de diámetro relativo $\Phi=0.12327$, en aire

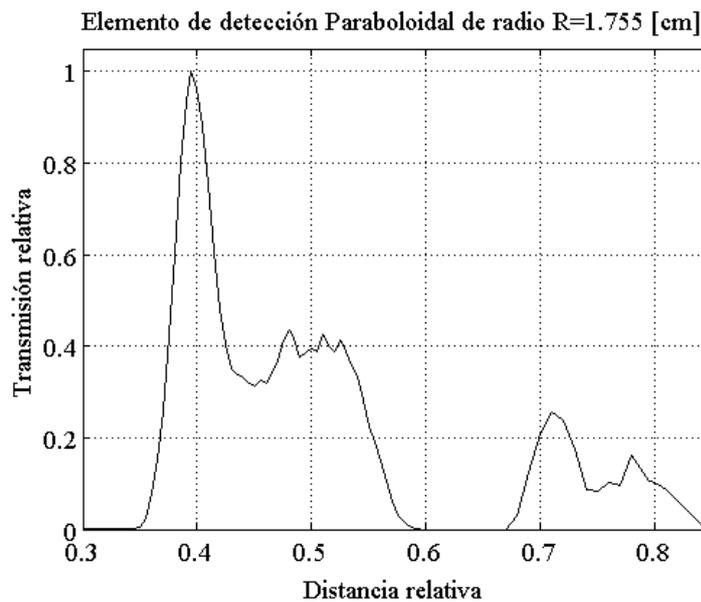


Figura 3.9. Respuesta teórica del sensor operando en modo de transmisión a diferentes distancias relativas A con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.05584$.

La figura 3.9 muestra una gráfica de la respuesta teórica a diferentes distancias relativas con aire como medio externo del elemento de detección paraboloidal de radio $R=1.755$ [cm]. Para este elemento de detección podemos observar cuatro ventanas de transmisión, las distancias relativas a las que se encuentran teóricamente las ventanas se presentan en la tabla 3.5.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.395
2	0.5
3	0.71
4	0.78

Tabla 3.5. Distancias relativas teóricas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección paraboloidal de diámetro relativo $\Phi=0.05584$, en aire

3.5. Conclusiones

Se describió el software utilizado para la obtención de predicciones teóricas.

Se planteó el método utilizado para la obtención de las ecuaciones de segundo grado que se aproximan a los elementos de detección utilizados.

Se obtuvieron predicciones teóricas de la transmisión de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal operando en modo transmisión en función de parámetros. Debido a las limitaciones del software utilizado, no fue posible realizar simulaciones de estos sensores en el modo de reflexión. Por esto, se diseñó y se implementó un experimento, el cual se describe en los siguientes capítulos.

Estudio Experimental de los Sensores Refractométricos de Fibra Óptica en Modo de Reflexión

4.1. Instalación Experimental

Con la finalidad de comprobar los resultados teóricos, se diseñó y armó una instalación de pruebas. La figura 4.1 muestra el diseño esquemático de dicha instalación. La instalación cuenta con una fuente óptica, diodo láser, (1) modulada por una señal eléctrica externa (2). El haz de luz que emite el diodo láser es dirigido hacia una fibra óptica de plástico (3) que transmite la radiación óptica hasta el otro extremo de la fibra donde la luz es acoplada con el elemento de detección en estudio(4). Una vez dentro de éste, el haz experimenta varias reflexiones internas, si el medio externo lo permite, hasta alcanzar un espejo (5) que refleja la luz hacia el elemento de detección nuevamente. Después de otra serie de reflexiones internas el haz de luz entra nuevamente en la fibra óptica en sentido contrario. Al salir de la fibra, la radiación incide en el acoplador óptico (7) que se encarga de dirigir el haz reflejado hacia el fototransistor(8), en el cual la señal óptica es convertida en una señal eléctrica y la información es guardada en una computadora (10) con la ayuda de un adquisidor de datos (9). Como es necesario conocer la respuesta de los elementos de detección cuando la fibra óptica se encuentra posicionada a diferentes distancias con respecto del centro del elemento, es necesario el uso de una unidad de desplazamiento (6) que permita el posicionamiento de la fibra en el lugar deseado.

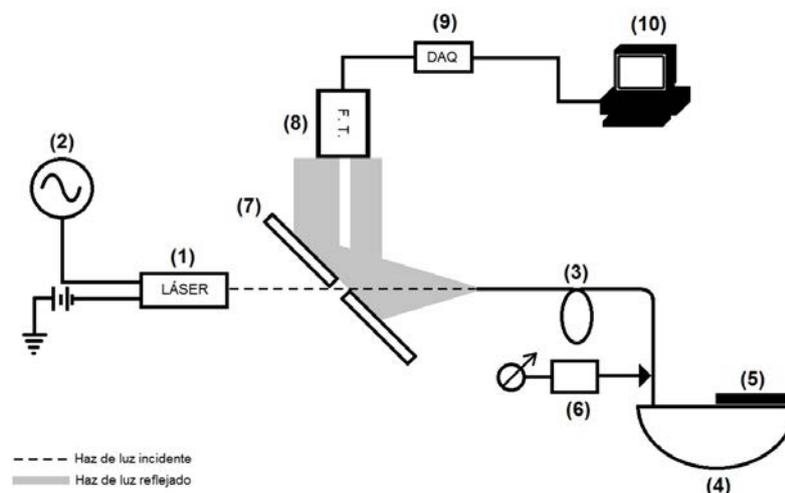


Figura 4.1. Diagrama esquemático del experimento. (1) Diodo Láser, (2) Señal moduladora, (3) Fibra óptica, (4) Elemento de detección, (5) Espejo, (6) Unidad de desplazamiento, (7) Acoplador óptico, (8) Fototransistor, (9) Adquisidor de datos, (10) Computadora.

Fuente óptica

La fuente de radiación óptica utilizada, figura 4.2, fue un diodo láser marca Coherent, número de parte 0221-202-00, longitud de onda 670 nm, potencia 5 mW, con un haz de luz de forma elíptica, clase IIIa. Fue modulado electrónicamente con una señal cuadrada de 300 Hz generada externamente con un circuito integrado 555. El láser se colocó sobre una base de metal que además de soportar el láser actúa como disipador térmico, ya que el láser irradia mucho calor y las especificaciones técnicas de éste advierten que no se deben rebasar los 40 °C.

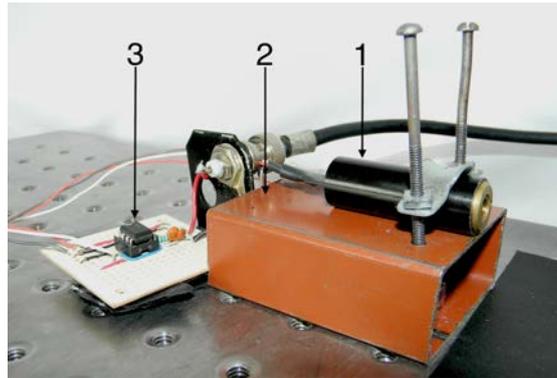


Figura 4.2. Fuente de radiación óptica. (1) Diodo láser, (2) Base, (3) Modulador externo.

Fibra óptica

Se utilizó una fibra óptica de plástico de polimetilmetacrilato (PMMA) de la marca Jiangxi Daisheng POF, diámetro de 1 mm, apertura numérica de 0.5, núcleo de diámetro igual a 0.98 mm, índice de refracción del núcleo de 1.492 e índice escalonado.

Antes de montar la fibra en la instalación tuvo que ser cortada y pulida perfectamente para evitar reflexiones en los extremos. Para llevar a cabo este procedimiento, se cortaron los extremos de la fibra con una cortadora para fibra óptica de plástico y después se pulió con tres lijas de agua de diferente grado, comenzando con una lija del 500, seguida de una del 1200 y para terminar una del 2000, una vez terminado el pulido con la lija se utilizó una pasta pulidora de PMMA, la cual ayudó eliminar las ralladuras provocadas por el grano de la lija. Para verificar un correcto corte y pulido se observó bajo el microscopio cada una de las etapas de preparación de la fibra.

En la figura 4.3 se puede apreciar como se colocó en la instalación el extremo de la fibra que se acopla al láser. Después de ser preparada se colocó dentro de un conector para fibras ópticas de \varnothing 1 mm (2) y ésta a su vez en una montura de posicionamiento marca Thorlabs Modelo F-PC05 XY (1) la cual permite ajuste fino de la fibra (4) en los ejes Y y Z. Un pedazo de papel terciopelo negro (3) fue colocado frente al conector para evitar que el conector introdujera reflexiones parásitas.

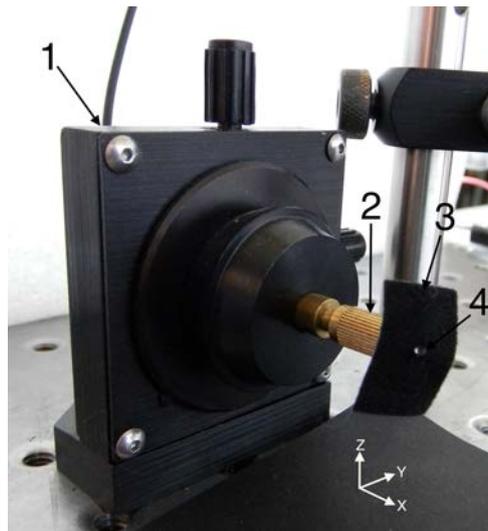


Figura 4.3. Colocación de la fibra óptica. (1) Montura de posicionamiento marca Thorlabs Modelo F-PC05 XY, (2) conector para fibra óptica de \varnothing 1 mm, (3) papel terciopelo negro, (4) fibra óptica.

Elementos de detección

Se utilizaron cuatro elementos de detección, dos paraboloïdales y dos elipsoidales de diferentes tamaños.

Para sostener los elementos de detección se diseñó un soporte con barras de acrílico, figura 4.4, con un mecanismo móvil (1) que permite sujetar diferentes tamaños de elementos de detección y que a su vez permite ajustar el transductor para que la superficie de éste se encuentre paralela al plano XY, perpendicular a la fibra. Una base para cámara fotográfica (2) también fue utilizada con el mismo propósito.

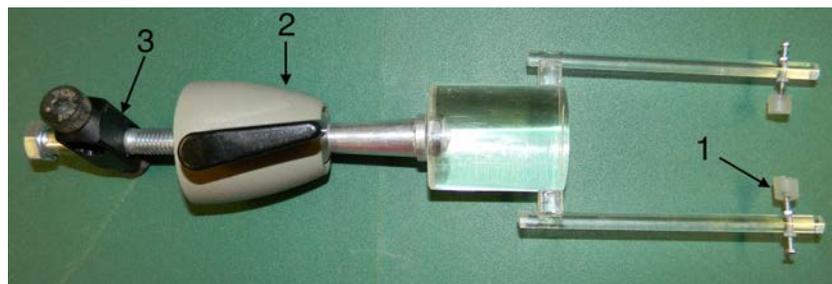


Figura 4.4. Soporte para los elementos de detección. (1) sujetadores móviles, (2) base de cámara fotográfica, (3) Abrazadera de miniposte de 90° marca Thorlabs modelo MSRA90

Espejo reflector

Con la finalidad de poder caracterizar el sensor en modo de reflexión, se colocó un espejo cubriendo la mitad de la superficie del elemento de detección, tal como se muestra en la figura 4.5 donde se aprecia cómo el espejo (1) es colocado sobre el elemento de detección (3) para que el haz de luz proveniente de la fibra óptica (2) pueda ser reflejado.

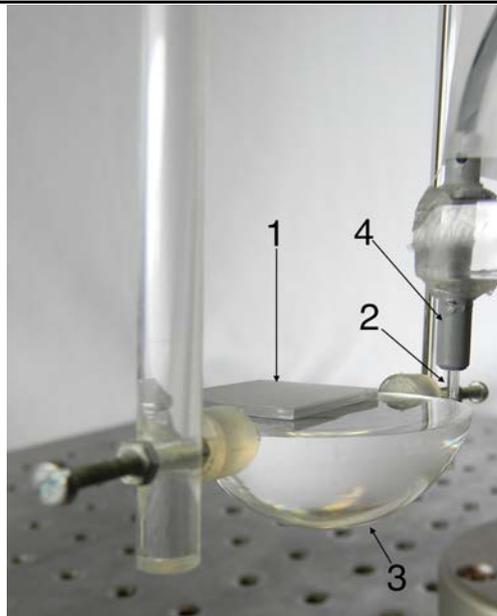


Figura 4.5. Elemento de detección en modo de reflexión. (1) Espejo, (2) Fibra óptica, (3) elemento de detección, (4) Conector V-PIN de Hewlett Packard para POF.

Unidad de desplazamiento

Para conocer la respuesta del sensor en diferentes puntos del elemento de detección, la fibra óptica fue movida por una unidad de desplazamiento, figura 4.6, de tres ejes marca Thorlabs, modelo PT3 (1). Estas unidades de desplazamiento están graduadas con la finalidad de conocer la distancia que se desplazan en tres ejes, con un rango que va de 0 a 25 mm y una resolución de 0.01 mm.

La fibra óptica fue sujeta a la unidad de desplazamiento con un soporte que consiste de un conector V-Pin de Hewlett-Packard para POF (3) introducido y adherido en una barra de acrílico con silicón; la barra de acrílico se atornilló a una placa de metal (2) y ésta a su vez a la unidad de desplazamiento. Gracias al tornillo que une la placa de metal y la barra de acrílico fue posible alinear la fibra paralela al eje Z.

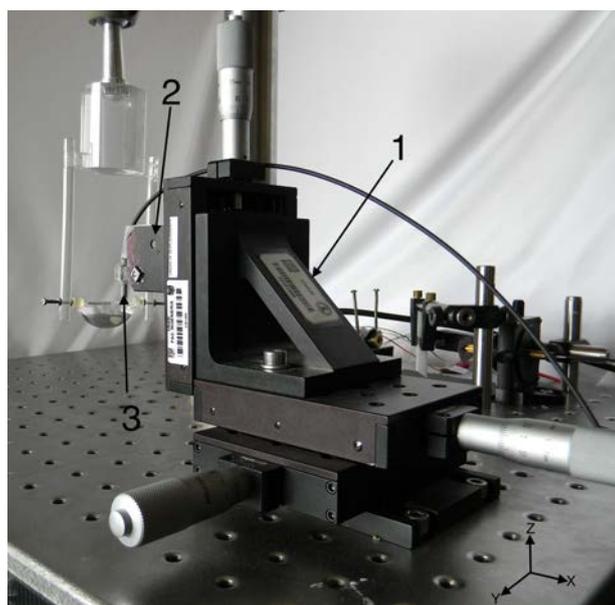


Figura 4.6. (1) Unidad de desplazamiento marca Thorlabs modelo PT3, (2) Soporte para conector, (3) Conector V-PIN de Hewlett Packard para POF.

Acoplador óptico

Una parte indispensable para poder realizar el experimento es contar con un dispositivo capaz de separar el haz de luz que incide en la fibra óptica, proveniente del láser, y el reflejado por el espejo hacia la misma fibra óptica. Este dispositivo es llamado acoplador óptico, en la figura 4.1 se puede observar el funcionamiento del acoplador. El acoplador fue construido con un espejo al cual se le hizo un pequeño orificio en el centro. Dicho espejo se colocó entre el láser y la fibra óptica a 45°.

El haz de luz incidente pasará a través del pequeño agujero hacia la fibra óptica y al elemento de detección para ser reflejado por el espejo. La radiación óptica reflejada que sale de la fibra será redirigida hacia el foto transistor por medio del acoplador óptico. Esto es posible gracias a la posición que tiene el espejo del acoplador con respecto de la fibra y el fototransistor; recordando que, de acuerdo con la ley de la reflexión, el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado. El hoyo realizado al espejo, tuvo que ser lo más pequeño posible con la finalidad de que el haz de luz incidente pasara a través de él hacia la fibra y a su vez hubiera el mínimo de pérdidas cuando el haz de luz reflejado fuera redirigido por el espejo hacia el fototransistor.

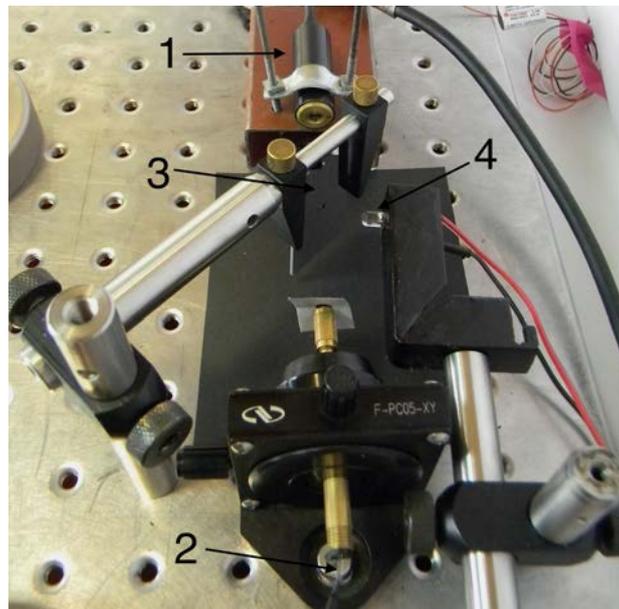


Figura 4.7. (1) Diodo láser, (2) Fibra óptica (3) Acoplador óptico, (4) Fototransistor

En la figura 4.7 podemos observar la parte de la instalación correspondiente al acoplador óptico (3). É ste dejará pasar el haz de luz proveniente del diodo láser (1) hacia la fibra óptica (2) y dirigirá el haz reflejado al fototransistor (4). Un acercamiento al acoplador es mostrado en la figura 4.8 donde podemos observar que el acoplador consta de un espejo (1) con un pequeño orificio en el centro (2). Este espejo fue colocado entre el láser y la fibra con una montura óptica de la marca Thorlabs (5) a 45° para que el haz de luz reflejado fuera redirigido hacia el fototransistor (6) que está soportado por una placa de metal (7).

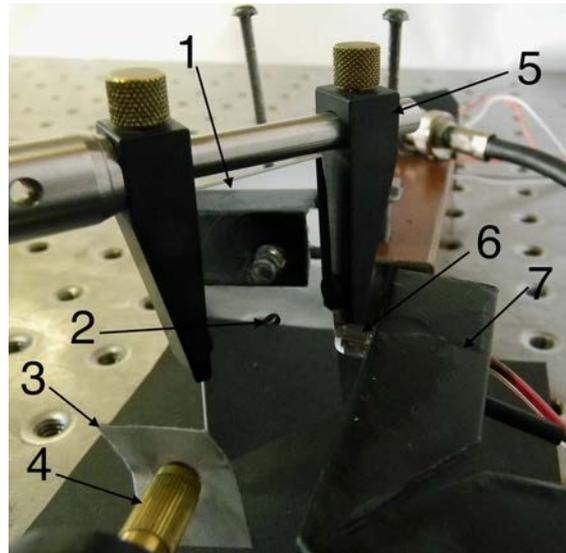


Figura 4.8. (1) Espejo, (2) Orificio, (3) Papel terciopelo, (4) Conector para fibra óptica de $\varnothing 1$ mm, (5) Montura óptica marca Thorlabs, (6) Fototransistor, (7) Placa de metal para sostener el fototransistor.

Fototransistor

El fotodetector utilizado fue un fototransistor PT331C, es un fototransistor NPN de silicio de alta sensibilidad y alta velocidad. El dispositivo es sensible a la radiación visible e infrarrojo cercano. La figura 4.9 muestra sensibilidad espectral relativa del fototransistor a diferentes longitudes de onda.

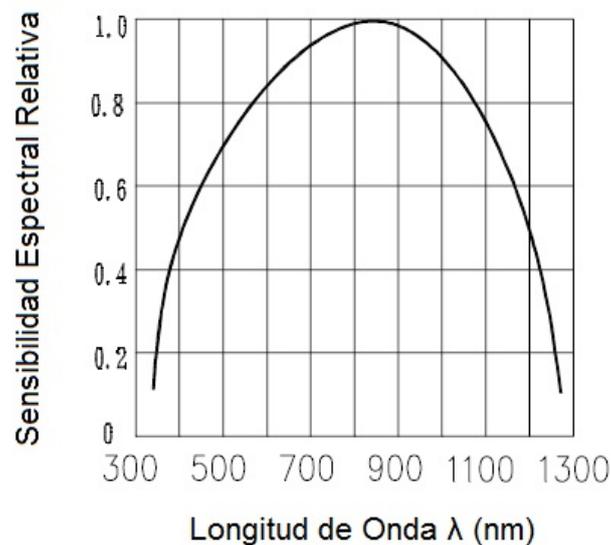


Figura 4.9. Sensibilidad espectral relativa del fototransistor PT331C

El fototransistor fue soportado por medio de una placa de metal, dos minipostes marca Thorlabs y una abrazadera para miniposte de 90° marca Thorlabs, gracias a los cuales fue posible posicionar el fototransistor en el lugar deseado para obtener la máxima potencia óptica.

Adquisidor de datos

Como adquisidor de datos se programó un Arduino UNO, anexo 1, para recibir, en una de sus entradas análogas, la mayor cantidad de niveles de voltaje en cada segundo posible, 1.6 kS/s aproximadamente. Estos valores de voltaje son enviados por el puerto serial a una computadora que guarda los datos de los experimentos mediante Matlab. Anexo 2, en un archivo .txt. La figura 4.10 muestra un diagrama de conexiones entre el fototransistor y el arduino.

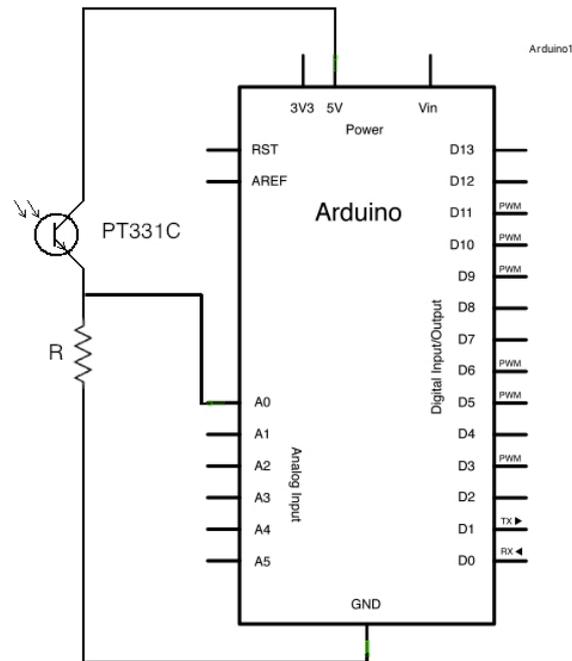


Figura 4.10. Diagrama de conexiones entre el Arduino y el fototransistor.

Una vez terminadas todas las pruebas necesarias para un elemento de detección se necesitan procesar los datos obtenidos, este procesamiento también se lleva a cabo con Matlab, anexo 3, mediante un algoritmo que descarta los ceros de la señal cuadrada, elimina los errores de lectura y promedia los valores de voltaje leídos. Como resultado Matlab entrega un archivo txt con las distancias adimensionales de las pruebas realizadas y sus respectivos promedios de voltajes, además de una gráfica de la respuesta del sensor.

4.2. Desarrollo experimental

Material

- Diodo Láser Coherent (# parte 0221-202-00)
- Circuito Integrado 555
- Resistencias y capacitores
- Barras de PMMA de \varnothing 6, 38, 30 mm
- Abrazadera de miniposte de 90°, marca Thorlabs, modelo MSRA90
- Abrazadera de poste de \varnothing 1.5'' , marca Thorlabs, modelo C1501
- Poste de \varnothing 1.5'' y 14'' de alto, marca Thorlabs, modelo P14
- MiniPoste de 2'' , marca Thorlabs, modelo MS2R
- MiniPoste de 3'' , marca Thorlabs, modelo MS3R
- Soporte de miniposte de 2'' , marca Thorlabs, modelo PH2
- Unidad de desplazamiento, marca Thorlabs, modelo PT3
- Montura de posicionamiento, marca Thorlabs, modelo F-PC05-XY
- Montura óptica, marca Thorlabs
- Breadboard óptica de la marca TMC
- Conector para fibra óptica de \varnothing 1 mm
- Cortadora para fibras ópticas de plástico(POF)
- Conectores de POF V-Pin de Hewlett-Packard
- Base móvil para cámara fotográfica
- Piezas de metal
- Arduino UNO
- Fototransistor PT331C
- Cables bnc- caimán
- Espejos
- Fuente de poder DC marca BK Precision, modelo 1672
- Refractómetro Abbe marca Kraüss Optronic, modelo AR3D-AR6D
- Agua, agua salada con 120 ppm de concentración, agua salada con 350 ppm de concentración y etilenglicol (anticongelante).

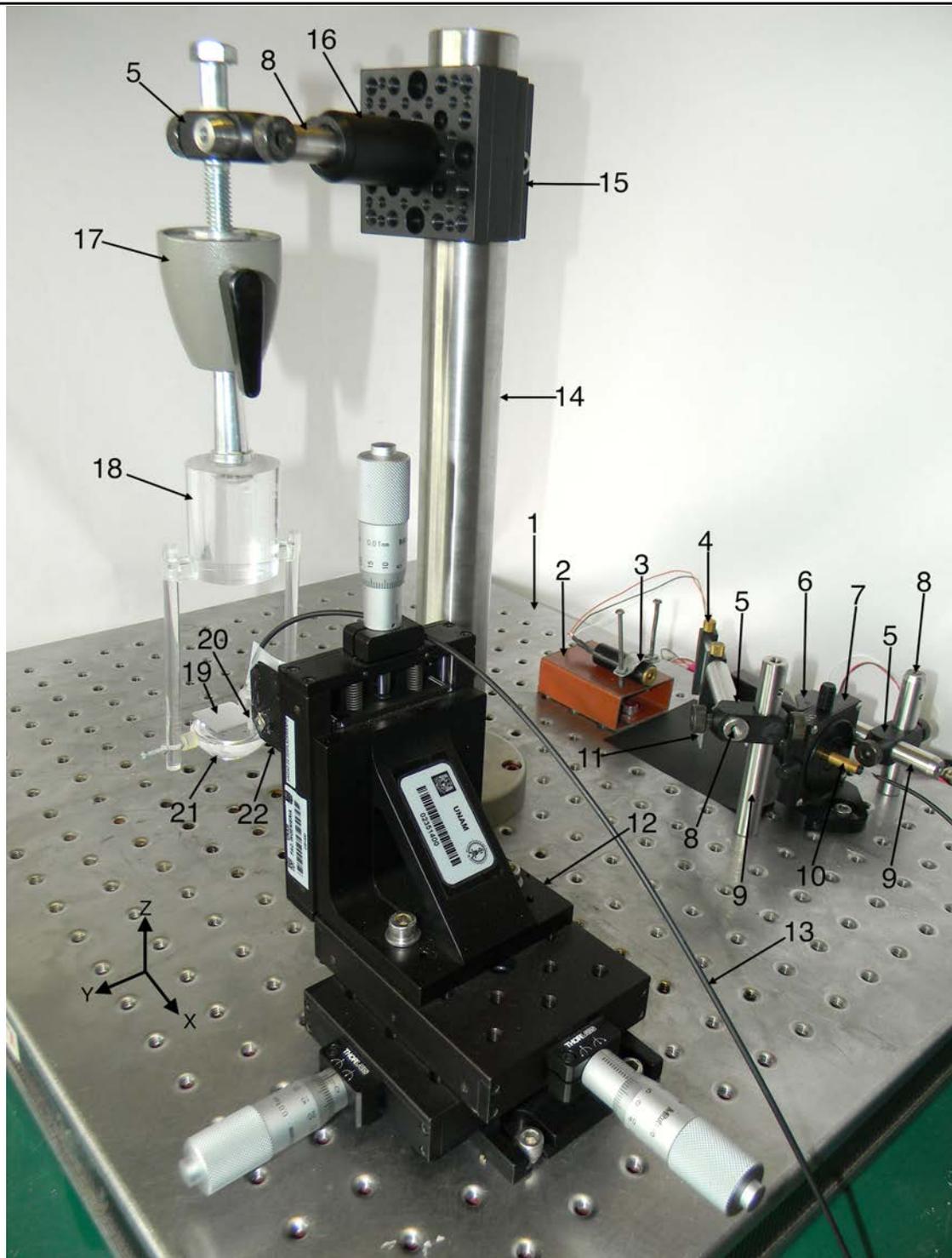


Figura 4.11. Arreglo experimental para el estudio de las características de transmisión de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloïdal y elipsoidal en modo de reflexión. (1) Breadboard óptica marca TMC, (2) Soporte de láser, (3) Diodo Láser, (4) Montura óptica marca Thorlabs, (5) Abrazadera de miniposte de 90° marca Thorlabs modelo MSRA90, (6) Placa de metal para soportar fototransistor, (7) montura de posicionamiento marca Thorlabs modelo F-PC05-XY, (8) MiniPoste de 2'' de alto marca Thorlabs modelo MS2R, (9) MiniPoste de 3'' de alto marca Thorlabs modelo MS3R, (10) conector para fibra óptica de $\phi 1$ mm, (11) Acoplador óptico, (12) Unidad de desplazamiento marca Thorlabs modelo PT3, (13) Fibra óptica de plástico, (14) Poste de $\phi 1.5''$ y 14'' de alto marca Thorlabs modelo P14, (15) Abrazadera de poste de $\phi 1.5''$ marca Thorlabs modelo C1501, (16) Soporte de miniposte de 2'' marca Thorlabs modelo PH2, (17) Base de cámara móvil, (18) Soporte de elementos de detección, (19) Espejo reflector, (20) conector V-PIN de Hewlett Packard, (21) Elemento de detección, (22) Placa de metal para soportar conector de fibra óptica.

A continuación se presenta la metodología para realizar los experimentos:

1. Preparar la fibra óptica, cortar y pulir
2. Armar la instalación mostrada en la figura 4.11
3. Alinear el láser y la fibra óptica, utilizando el receptor para monitorizar que se tenga un máximo de amplitud
4. Posicionar el acoplador óptico a 45° con respecto de la fibra y el haz de luz y colocar el fototransistor tal como se muestra en la figura 4.1. Utilizar el receptor para encontrar el máximo de amplitud
5. Colocar uno de los elementos de detección disponibles en el soporte y alinear la superficie de éste al plano XY
6. Encender el láser y con el haz de luz alinear la fibra sobre el eje X, ver figura 4.12 para un correcto alineamiento de la fibra
7. Colocar el espejo sobre la mitad izquierda del elemento de detección
8. Llevar la fibra al borde derecho del elemento de detección, de tal manera que la parte interna de la fibra se encuentre en el límite del elemento de detección, ver figura 4.13. Esta distancia será $R+D/2$. Donde R es el diámetro del elemento y D el diámetro de la fibra
9. Elevar las fibras unos 0.2 mm de la superficie del elemento de detección para evitar rayarlo
10. Desplazar la fibra 0.05 mm hacia el centro del elemento
11. Ejecutar el programa de Matlab para obtener los datos del arduino
12. Repetir los pasos 10 y 11 cuantas veces sea necesario hasta que la fibra llegue al centro
13. Ejecutar el programa para procesar los datos
14. Una vez realizadas todas las pruebas con aire como medio externo, se sumerge el elemento de detección en diferentes medios líquidos hasta la superficie y se repiten los pasos 8 a 13 con cada uno de los líquidos

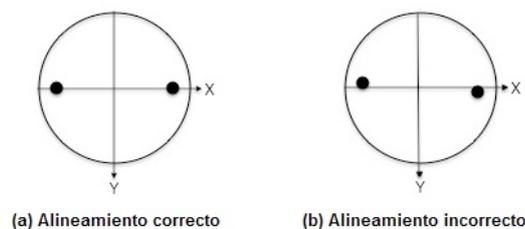


Figura 4.12. Alineación de las fibras

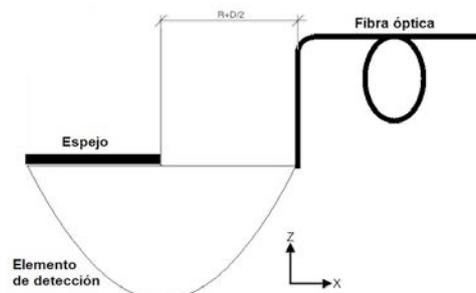


Figura 4.13. Posición inicial de la fibra óptica.

Dicho procedimiento se realizó con aire, agua, agua salada 120 ppm de concentración, agua salada 350 ppm de concentración, y etilenglicol (anticongelante) como medio externo. Para conocer el índice de refracción de estas sustancias se utilizó un Refractómetro Abbe marca

Kraüss Optronic, modelo AR3D-AR6D. La tabla 4.1 muestra el índice de refracción de dichos medios.

Medio externo	Índice de refracción n
Aire	1
Agua	1.333
Agua salada, 120 ppm	1.3475
Agua salada, 350 ppm	1.3755
Etilenglicol (anticongelante)	1.39

Tabla 4.1. Índices de refracción de los diferentes medios.

4.3. Estudio de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal en modo de transmisión

Con la finalidad de poder comparar los experimentos realizados con trabajos previamente hechos, se diseñó y armó una instalación, similar a la previamente descrita, para conocer la respuesta de los elementos de detección trabajando en modo de transmisión, es decir una fibra óptica para transmitir y otra para recibir. La figura 4.14 muestra un diagrama esquemático de la instalación.

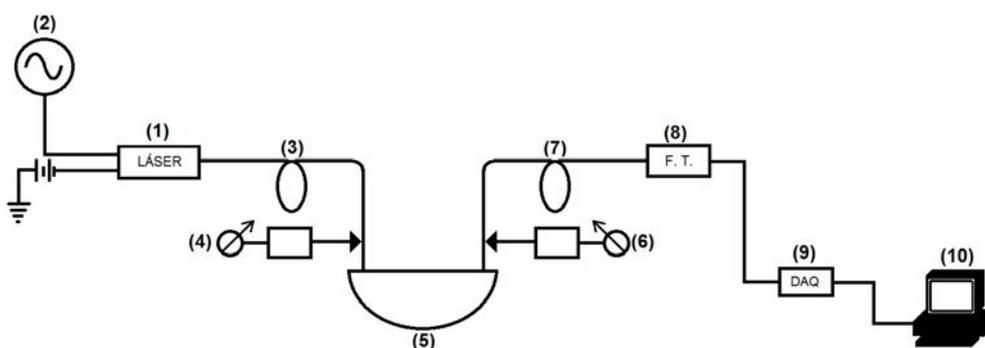


Figura 4.14. Diagrama esquemático del experimento en modo de transmisión. (1) Diodo Láser, (2) Señal moduladora, (3) Fibra óptica, (4) Unidad de desplazamiento de la fibra emisora, (5) Elemento de detección, (6) Unidad de desplazamiento de la fibra receptora, (7) Fibra óptica receptora, (8) Fototransistor, (9) Adquisidor de datos, (10) Computadora.

Como se observa en la figura anterior, para estos experimentos son necesarias dos fibras ópticas, una para transmitir y otra para recibir, lo que implica que no es necesario ni el espejo reflector ni el acoplador óptico, la fibra óptica receptora se conectará directamente al fototransistor con un conector de fibra óptica a LED de 5mm. Ambas fibras deben encontrarse a la misma distancia del centro del elemento en todo momento, por lo que también es necesaria otra unidad desplazamiento.

4.4. Conclusiones

Se diseñó y armó una instalación experimental para obtener la respuesta de los sensores refractométricos de fibra óptica operando en modo de reflexión y transmisión.

Se describieron todos los componentes de la instalación experimental implementada.

Se planteó una metodología para la caracterización de los sensores de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal operando en modo de reflexión.

Resultados Experimentales

Los resultados presentados a continuación corresponden a la respuesta de los sensores refractométricos con los diferentes elementos de detección. Las potencias ópticas dibujadas en las gráficas son presentadas en voltajes normalizados. Todos los voltajes experimentales de un elemento de detección, ya sea en el aire, agua o anticongelante, se dividieron entre el mayor voltaje recabado en el aire y de esta manera se obtuvieron los voltajes normalizados.

- *Sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección Elipsoidal de radio $R=0.758$ [cm] operando en modo de reflexión*

La gráfica de la figura 5.1 muestra la respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con diferentes medios externos, con elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm], diámetro relativo $\Phi=0.12484$, operando en modo de reflexión.

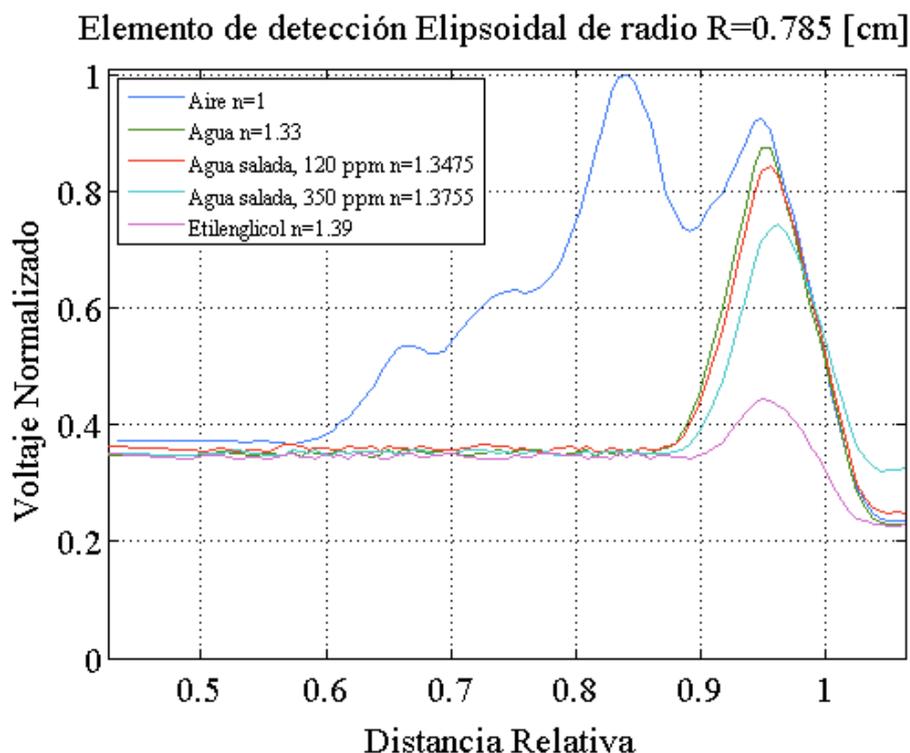


Figura 5.1. Respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.12484$, operando en modo de reflexión, con diferentes medios externos.

Discusión

En esta figura podemos observar, de color azul, el comportamiento que tiene el sensor a múltiples distancias relativas A con aire como medio externo, es decir el índice de refracción del medio ($n=1$) es mucho menor que el del elemento de detección ($n=1.492$), por lo que se espera que la reflexión interna en el transductor sea total. Se puede apreciar que existen cuatro ventanas de transmisión. En la tabla 5.1 se presentan las distancias relativas a las que se encuentran las ventanas de transmisión.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.6624
2	0.7516
3	0.8407
4	0.9490

Tabla 5.1. Distancias relativas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.12484$, con aire como medio externo.

Por otra parte se presenta la respuesta de los sensores a múltiples distancias relativas con diferentes medios externos: de color verde la respuesta con agua ($n=1.33$); de rojo con agua salada 120 ppm de concentración ($n=1.3475$); de cian con agua salada 350 ppm de concentración ($n=1.3755$); y de magenta con etilenglicol (anticongelante) ($n=1.39$). Se aprecia que para estos medios externos solamente se hace presente la primera ventana de transmisión, esto se debe a que cuando las fibras se encuentran cercanas al extremo del elemento de detección el número de reflexiones aumenta, por lo que la sensibilidad al medio externo también aumentará [16].

En la gráfica se nota que ninguna de las cinco señales llega a cero. A distancias relativas mayores de 1.044, la potencia óptica detectada debería ser cero, ya que el núcleo de la fibra óptica se encuentra, en su mayoría, fuera del elemento de detección, pero no es cero, se acerca a 0.25, debido a que hay algunas reflexiones parásitas. En el diseño de la instalación se buscó evitar estas reflexiones parásitas, pero cada acoplamiento de luz tiene reflexiones que no pueden ser evitadas. Por ejemplo, al incidir el haz de luz en la fibra, una parte del haz es reflejada y detectada por el fotodetector, de igual manera sucede en la punta de salida de la fibra. A distancias relativas menores de 0.6 se observa que ya no hay ventanas de transmisión y la potencia óptica recibida se mantiene alrededor de 0.36, este valor es mayor al de las distancias relativas superiores a 1.044 ya que el elemento de detección también refleja cierta cantidad de luz. Por lo que hay que tomar en cuenta que existe una componente de directa en las curvas presentadas.

Una gráfica de la respuesta a diferentes índices de refracción del sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm], de diámetro adimensional $\Phi=0.124841$, a una distancia relativa $A=0.949$, es mostrada en la figura 5.2. Esta gráfica muestra una comparación de las predicciones teóricas y los resultados experimentales.

Podemos observar que la aproximación de los resultados experimentales es buena y que el sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm], de diámetro adimensional $\Phi=0.124841$, a una distancia relativa $A=0.949$, puede ser utilizado como sensor refractométrico en un rango aproximado de índices de refracción de 1.3 a 1.4.

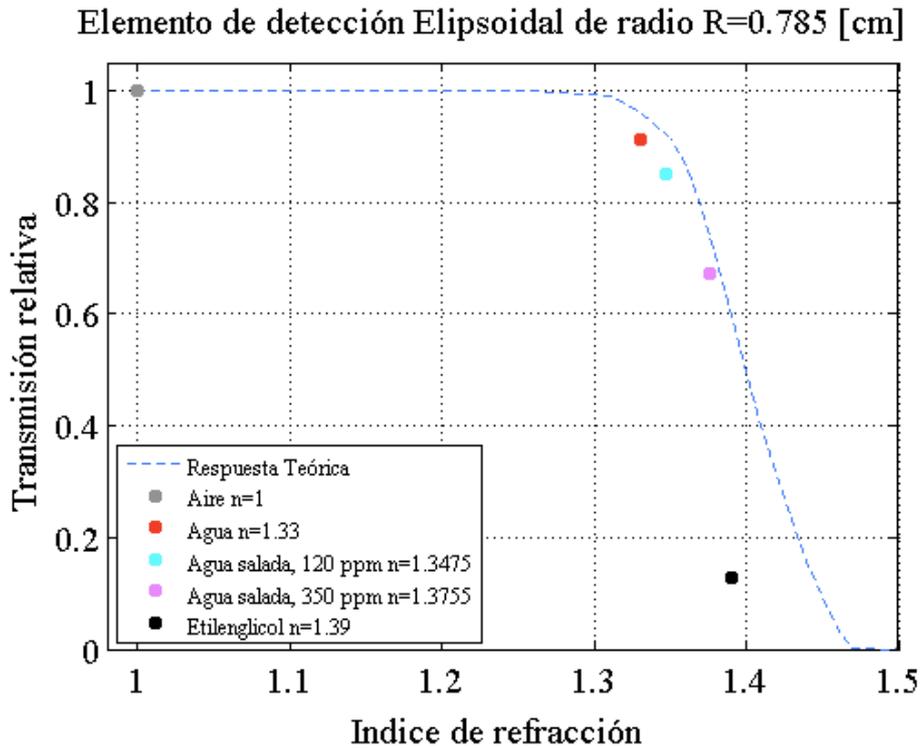


Figura 5.2. Transmisión relativa del sensor refractométrico con elemento de detección elipsoidal de radio adimensional $\Phi=0.124841$ a una distancia relativa $\Lambda=0.949$, a diferentes índices de refracción. Resultados teóricos conjuntamente con predicciones experimentales.

- **Sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección Elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm] operando en modo de reflexión**

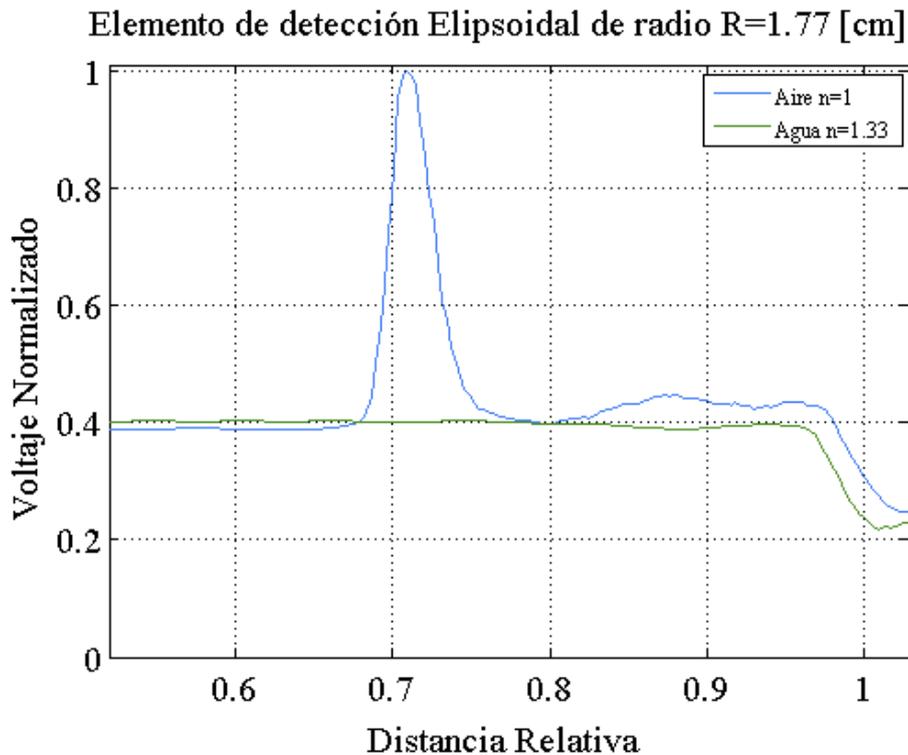


Figura 5.3. Respuesta del sensor a múltiples distancias relativas Λ , con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.055367$, operando en modo de reflexión, con diferentes medios externos.

La gráfica de la figura 5.3 muestra la respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con diferentes medios externos, con elemento de detección elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm], diámetro relativo $\Phi=0.055367$, operando en modo de reflexión.

Discusión

De igual manera que para el elemento de detección anterior, la curva color azul representa la respuesta a múltiples distancias relativas cuando el medio externo es el aire, por lo que se espera que dentro del elemento de detección existan reflexión interna total. A diferencia del elemento anterior, éste tiene solo dos ventanas de transmisión. La segunda ventana es muy pequeña, pero perceptible. La tabla 5.2 muestra las distancias relativas a las que se encuentran estas ventanas de transmisión.

Ventana de Transmisión	Distancia relativa A
1	0.709
2	0.877

Tabla 5.2. Distancias relativas A a las que se encuentran las ventanas de transmisión del sensor refractométrico con elemento de detección elipsoidal de diámetro relativo $\Phi=0.055367$, con aire como medio externo.

Este elemento de detección solo se probó con otro medio externo, agua, ya que los resultados muestran que a partir de este índice de refracción el elemento ya no transmite la luz.

- **Sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección Paraboloidal de radio $R=0.795$ [cm] operando en modo de reflexión**

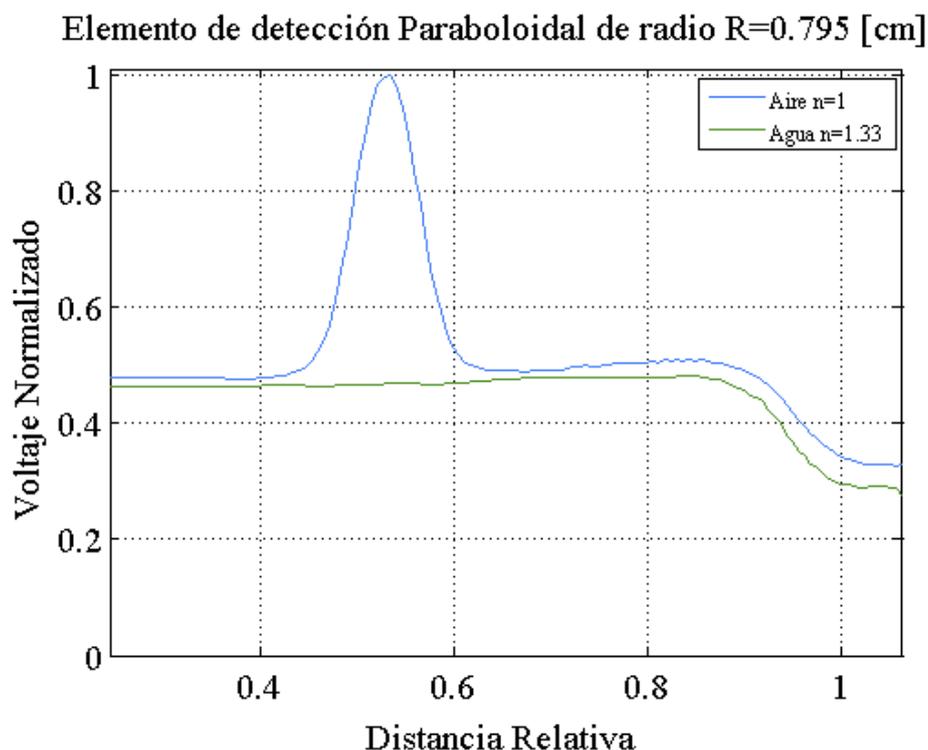


Figura 5.4. Respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con elemento de detección paraboloidal de diámetro relativo $\Phi=0.12327$, operando en modo de reflexión, con diferentes medios externos.

La gráfica de la figura 5.4 muestra la respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con diferentes medios externos, con elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.795$ [cm], diámetro relativo $\Phi=0.12327$, operando en modo de reflexión.

Discusión

La curva de color azul representa la respuesta a múltiples distancias relativas cuando el medio externo es el aire. Para este elemento de detección solamente se observa una ventana de transmisión en $A=0.5346$. De igual manera que en el transductor anterior, para este elemento solo se utilizó agua como medio externo.

- **Sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección Paraboloidal de radio $R=1.755$ [cm] operando en modo de reflexión**

La gráfica de la figura 5.5 muestra la respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con diferentes medios externos, con elemento de detección elipsoidal de radio $R=1.755$ [cm], diámetro relativo $\Phi=0.05584$, operando en modo de reflexión.

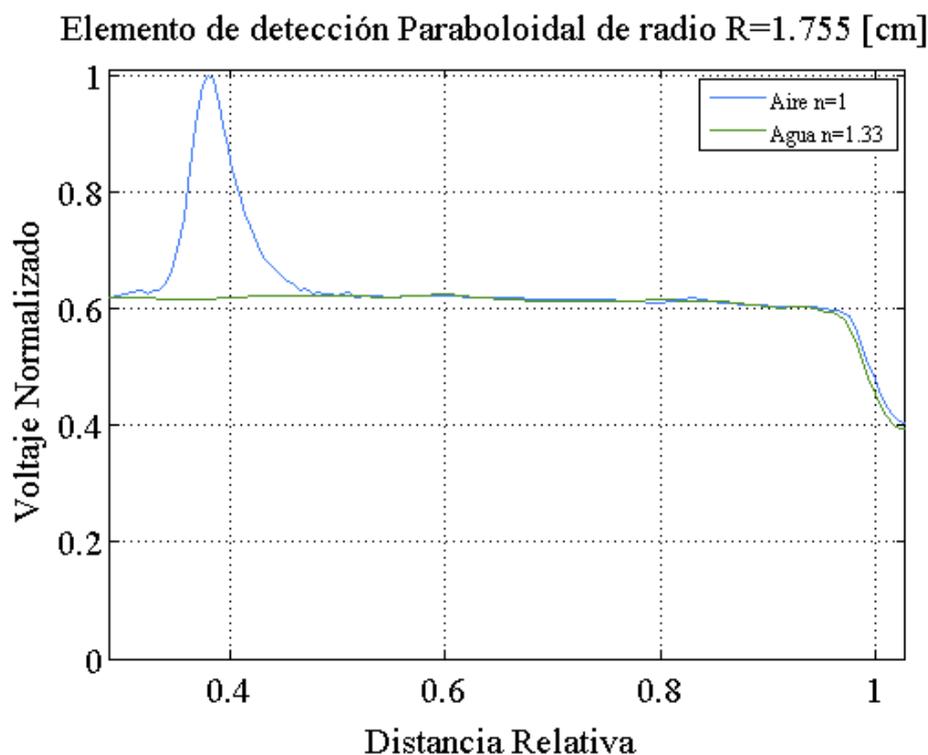


Figura 5.5. Respuesta del sensor a múltiples distancias relativas A , con elemento de detección paraboloidal de diámetro relativo $\Phi=0.05584$, operando en modo de reflexión, con diferentes medios externos.

Discusión

En este elemento de detección se puede observar una ventana de transmisión en $A=0.3789$. Una parte interesante en esta gráfica, es la amplitud de la ventana de transmisión. Se puede observar que la componente de directa se encuentra en 0.6, esto no quiere decir que haya más potencia óptica reflejada que en las anteriores, si no que la ganancia de este elemento de detección es mucho más pequeña que la de los anteriores, un 20% menos aproximadamente. Para este elemento solo se utilizó agua como medio externo, por la misma razón que los anteriores.

- ***Comparación entre las predicciones teóricas, los sensores operando en modo de transmisión y los sensores operando en modo de reflexión***

La gráficas mostradas en la figuras 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 presentan las respuestas de los diferentes transductores a múltiples distancias relativas con aire como medio externo, comparando las predicciones teóricas (línea discontinua color azul), los resultados de los sensores refractométricos trabajando en modo de transmisión (línea color verde) y de los sensores refractométricos trabajando en modo de reflexión (línea color roja).

Discusión

En general se observa una concordancia en las ventanas de transmisión bastante buena. En el elemento elipsoidal más pequeño, figura 5.6, las últimas dos ventanas coinciden muy bien, la segunda ventana de transmisión que se hace presente en el modo de reflexión, no existe en el modo de transmisión. La primera ventana de transmisión concuerda en el modo de reflexión, de transmisión y con las predicciones teóricas, aunque con menor intensidad.

El resto de los elementos de detección presentan la primera ventana de transmisión muy parecida, en cambio las últimas ventanas de transmisión presentes en el modo de transmisión y en las predicciones teóricas, desaparecen en el modo de reflexión.

Las diferencias, que aunque son pocas, existen, pueden deberse a diferentes razones. La primera de ellas es a un alineamiento incorrecto de las fibras o de los elementos transductores al momento de realizar los experimentos, ésta es la causa más probable en la diferencia en distancias relativas de las ventanas de transmisión.

Por otro lado hay que tomar en cuenta que las simulaciones fueron aproximaciones inexactas, ya que los elementos de detección no obedecían a ecuaciones de segundo grado, y por lo tanto, se puede decir que se simularon otros elementos muy parecidos. Además hay que tomar en cuenta que el simulador considera un acoplamiento perfecto entre el elemento y las fibras, en los experimentos realizados se dejó un espacio de aire entre los elementos y las fibras, lo que genera refracciones por el cambio de medio, así como un cambio en el ancho del haz de luz incidente en el elemento de detección debido a la apertura numérica de la fibra.

Por último, se debe considerar que al trabajar en modo de transmisión se utilizan dos fibras, lo que tiene varias implicaciones: en el elemento transductor se experimentan la mitad de reflexiones internas, lo que lleva a menos pérdidas; en modo de reflexión el haz reflejado es de una forma diferente al haz incidente, por lo que hay ciertas diferencias en el trazado de rayos, y la respuesta será diferente; el acoplador óptico utilizado es poco eficiente ya que mucha potencia óptica se pierde alrededor del fototransistor, en modo de transmisión la mayoría de la potencia óptica entra en el fotodetector debido a que la fibra provee un mejor acoplamiento.

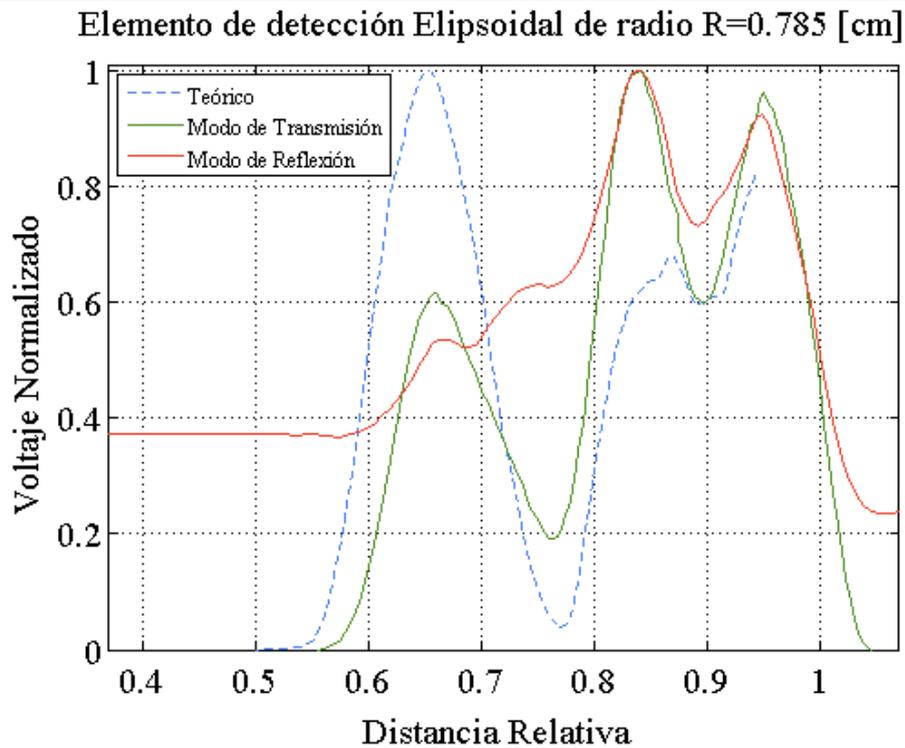


Figura 5.6. Respuesta del sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección elipsoidal con radio adimensional $\Phi=0.124841$ a diferentes distancias relativas A con aire como medio externo. Comparación de las predicciones teóricas, resultado experimentales en modo de reflexión y en modo de transmisión.

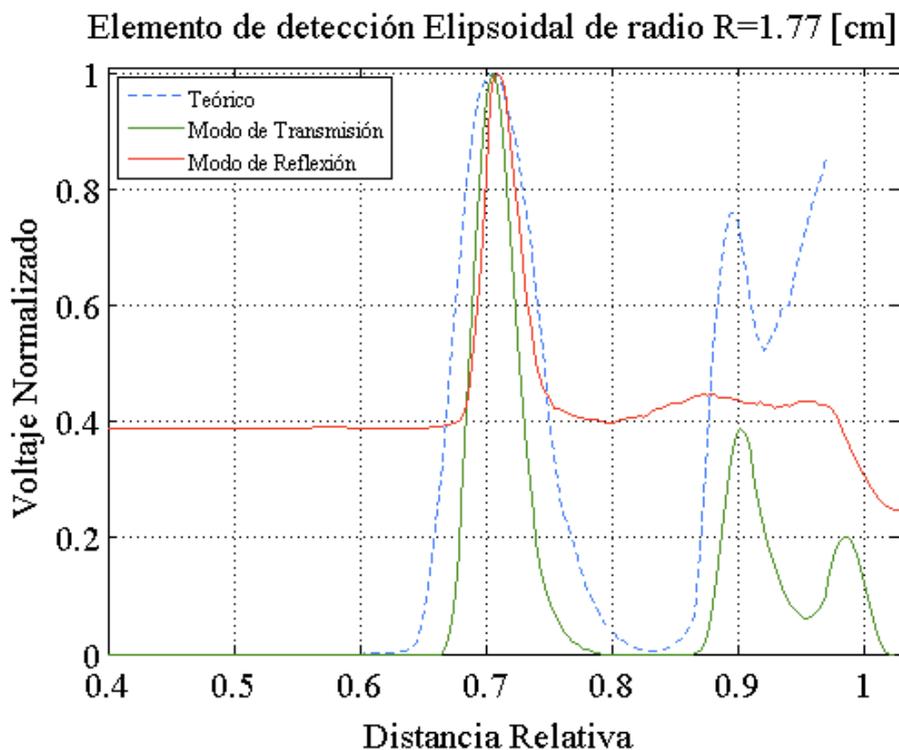


Figura 5.7. Respuesta del sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección elipsoidal con radio adimensional $\Phi=0.055367$ a diferentes distancias relativas A con aire como medio externo. Comparación de las predicciones teóricas, resultado experimentales en modo de reflexión y en modo de transmisión.

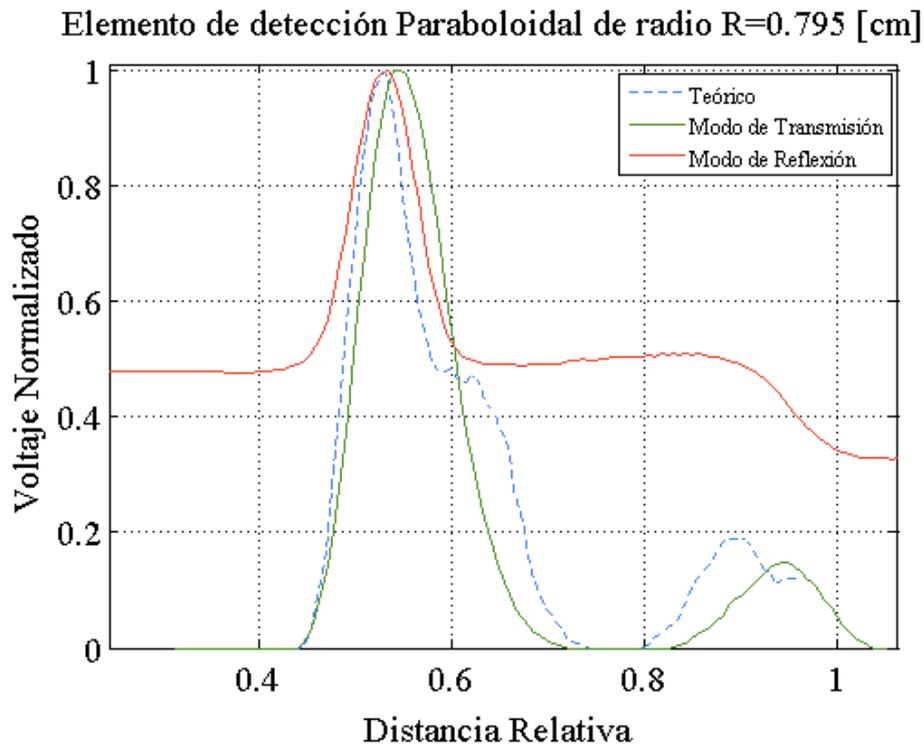


Figura 5.8. Respuesta del sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección paraboloïdal con radio adimensional $\Phi=0.123270$ a diferentes distancias relativas Λ con aire como medio externo. Comparación de las predicciones teóricas, resultado experimentales en modo de reflexión y en modo de transmisión.

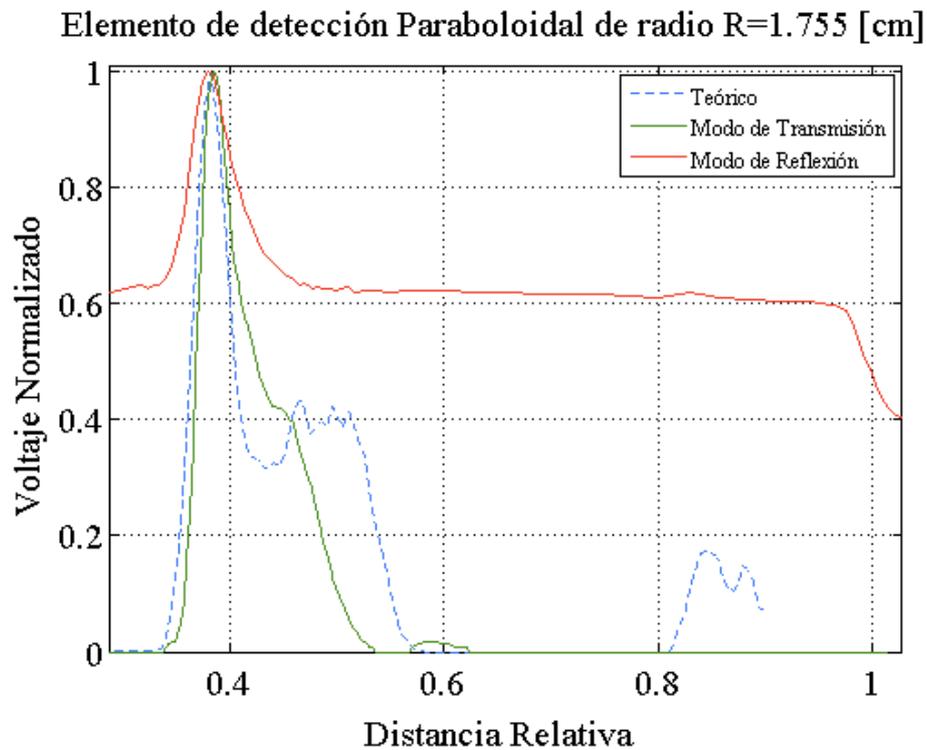


Figura 5.9. Respuesta del sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección paraboloïdal con radio adimensional $\Phi=0.055840$ a diferentes distancias relativas Λ con aire como medio externo. Comparación de las predicciones teóricas, resultado experimentales en modo de reflexión y en modo de transmisión.

5.1. Conclusiones

Se demostró el funcionamiento de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal en modo de reflexión.

Se observaron las diferentes ventanas de transmisión que presentan a distintas distancias relativas en cada uno de los elementos de detección.

Las diferencias entre los resultados teóricos y experimentales son mínimas. Estas diferencias podemos atribuirles a la forma imperfecta de las muestras de los elementos de detección; posibles diferencias entre la forma real de una muestra de elemento de detección y su aproximación con un polinomio; posibles imperfecciones de alineación de las fibras ópticas con respecto al eje óptico de un elemento de detección y algunos otros factores.

Capítulo 6

Conclusiones generales

- ❖ Se obtuvieron las características teóricas y experimentales de los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección elipsoidales y paraboloidales operando en modo de transmisión.
- ❖ Se armó y probó la efectividad de una instalación experimental para utilizar los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección elipsoidales y paraboloidales en modo de reflexión.
- ❖ Se propuso una metodología para la caracterización de los sensores refractométricos de fibra óptica operando en modo de reflexión.
- ❖ Se comprobó que los sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección paraboloidal y elipsoidal pueden funcionar eficientemente en modo de reflexión.
- ❖ Se caracterizaron 4 elementos de detección, dos paraboloidales y dos elipsoidales, con un fibra óptica de plástico multimodo de índice escalonado y apertura numérica 0.5 operando en modo de reflexión.
- ❖ Se mostró que las distancias relativas en las se presentan ventanas de transmisión con aire como medio externo para el elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm] operando en modo de reflexión son: $A=0.6624$, $A=0.7516$, $A=0.8407$ y $A=0.949$. Para el elemento de detección elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm] operando en modo de reflexión son: $A=0.709$ y $A=0.877$. Para el elemento de detección paraboloidal de radio $R=0.795$ [cm] operando en modo de reflexión es: $A=0.5346$. Para el elemento de detección paraboloidal de radio $R=1.755$ [cm] operando en modo de reflexión es: $A=0.3789$.
- ❖ Se demostró que el elemento de detección elipsoidal de radio $R=0.785$ [cm] utilizado en este trabajo, a una distancia relativa de $A=949$, puede ser utilizado como sensor refractométrico en un rango aproximado de índices de refracción de 1.3 a 1.4, por lo que se puede discriminar entre diferentes medios externos en este intervalo de índices de refracción, como agua, agua salada en diferentes concentraciones y etilenglicol.
- ❖ Se probó que los elementos de detección: elipsoidal de radio $R=1.77$ [cm], paraboloidal de radio $R=0.795$ [cm] y paraboloidal de radio $R=1.755$ [cm] utilizados para este trabajo pueden ser utilizados para la medición de nivel de líquidos.

- ❖ Se presentó una comparación entre el modo de transmisión y modo de reflexión que muestra que la respuesta de los elementos de detección es muy similar en ambos casos, por lo que ambos métodos pueden ser utilizados en la práctica. Sin embargo, el modo de reflexión tiene la ventaja de utilizar una sola fibra óptica en lugar de dos. Esta diferencia es de gran ventaja en el caso de arreglos grandes de sensores refractométricos, tales como los empleados en los medidores de nivel de líquidos, en forma de arreglos verticales con docenas y cientos de sensores refractométricos individuales.

Referencias

- [1] C. A. García Cadena, “Colector de luz solar indirecta para iluminación de interiores”, Tesis de maestría, UNAM, México, 2013.
- [2] Gred Keiser, “Optical Communications Essentials”, McGraw Hill, New York, 2013.
- [3] Takashi Takeo and Hajime Hattori. “Silica glass fiber photorefractometer”, Applied Optics, Vol. 31, No.1, pp. 44-50, January 1992.
- [4] M Lomer, A Quintela, M López-Amo, J Zubia and J M López-Higuera, “A quasi-distributed level sensor based on a side-polished plastic optical fibre cable”, Meas. Sci Technol. Vol. 18, pp. 2261-2267, June 2007.
- [5] M. Lomer, J. Arrue, C. Jauregui, P. Aiestaran, J. Zunia and J. M. López-Higuera, “Lateral polishing of bends in plástica optical fibers applied to multipoint liquid-level measurment sensor”, Sensore and Acuators, Vol. A 137, pp. 68-73, March 2007
- [6] M. Lomer, C. A. Galindez, M. A. Quintela, A. Quintela, J. Mirapeiz and J. M. Lopez-Higuera, “Refractometric Sensor Base don Induced Losses in the Region of Transition from a Curved Side-Polished Fiber”, Proc. of SPIE, Vol. 7004, pp. 1 – 5, 2008.
- [7] Martin S. Meyer and Gary L. EEsley, “Optical fiber refractometer”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 58 (11), pp. 2047-2048, November 1987.
- [8] Pabitra Nath and Pranayee Datta, Kanak Ch Sarma, “All fiber-optic sensor for liquid level measurement”, Microwave and optical technology letter, Vol. 50, No. 7, pp. 1982-1984, July 2008.
- [9] Sameer M. Chandani and Nicolas A. F. Jaeger, “Optical fiber-based liquid level sensor”, Oprical Engineering, Vol. 46 (11), 114401, pp. 1-7, November 2007.
- [10] Saurabh Mani Tripathi, Arun Kumar, Emmanuel Marin and Jean-Pierre Meunier, “Highly sensitive refractive index sensor based on cladding mode interference in microtapered SMF”, Proc of SPIE, Vol. 7753, pp. 1-4, 2011.
- [11] Piter L. Twart, “Long-Period grating Michelson refractometric sensor”, Meas. Sci. Technol, Vol. 15, pp. 1576-1580, July 2004.
- [12] Dae Woong Kim, Yang Zhang, Kristie L. Cooper and Anbo Wang, “In-fiber mode refractometer based on a long-period gratin for external refractive-index measurement”, Aplied Optics, Vol. 44, No. 26, pp. 5368-5373, September 2005.
- [13] I. Flores Llamas, O. Kolokoltsev and V. Svyryd, “Refractometric sensors based on long period optical fiber gratings”, Revista Mexicana de Física Vol. S 52 (2), pp. 75-78, February 2002.
- [14] Sergei Khotianintsev, Enrique Llanito-Caudillo, Selene Perez-Garcia and Jordi Morales-Farah, “Optical-fiber Refractometric Sensor with Semi-Cylindrical Optical Detection Element for Measuring the level of Gasoline”, CERMA, IEEE, pp. 468-473, 2009.

- [15] Sergei Khotiaintsev, Selene Pérez-García, Alfredo Beltrán-Hernández and Enrique Llanito-Caudillo, “Plastic optical fiber multipoint liquid-level sensor with single semicylindrical detection element”, Proc. of SPIE, Vol. 7839, pp. 1-4, 2010.
- [16] Selene Pérez García, “Estudio de las fibras ópticas de plástico como medio de transmisión y como transductores de los sensores ópticos”, Tesis para obtener el grado de Maestra en ingeniería, UNAM, México, 2010.
- [17] Vladimir Svirid and Sergei Khotiaintsev, “Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element”, Opt. Eng, Vol. 41 (4), pp. 779-787, April 2002.
- [18] Katya E. Romo-Medrano, Sergei N. Khotiaintsev and Victor García-Garduño, “Optical-fiber sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft”, Meas. Sci. Technol. Vol. 15, pp. 1568-1575, July 2004.
- [19] Katya Romo-Medrano M., Sergei Khotiaintsev and Adriana García-Moreno, “Analysis of refractometric optical-fiber sensors: comparison between different forms of optical detection elements”, Proc. of SPIE, Vol. 5776, pp. 409-420, 2005.
- [20] Katya E. Romo-Medrano and Sergei N. Khotiaintsev, “An optical-fiber refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen”, Meas. Sci. Technol, Vol. 17, pp. 998-1004, April 2006.
- [21] S. Khotiaintsev, K. Khotiaintsev and A. Garcia-Moreno, “Modeling of the fiber-optical water salinity sensor”, Proc. 2006 International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM), IEEE/LEOS, pp. 36-38, 2006.
- [22] Alice L. S. Cruz, Antonio C. C. Migliano and Marcos A. R. Franco, “Refractive index sensor based on terahertz multimode interference fiber device”, Proc. of SPIE, Vol. 8794, pp. 1-4, 2013.
- [23] K. Khotiaintsev, “Desarrollo de una aplicación de simulación numérica de sensores refractométricos en fibras ópticas”, tesis para obtener el grado de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2005.
- [24] Jordi Elias Morales Farah, “Efectos de la absorción del medio en la respuesta de un sensor refractométrico en fibras ópticas”, tesis para obtener el grado de licenciatura, UNAM, México, 2006.
- [25] Liberty Arleen Ayvar Campos, “Sensores refractométricos de fibra óptica con elementos de detección parabólico y elíptico”, tesis para obtener el grado de licenciatura, UNAM, México, 2012.

Anexos

Anexo 1. Programa de Arduino como adquisidor de datos

```
int out1 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200); // inicializar puerto serie
}

void loop() {
  out1 = analogRead(A0); // leer nivel de voltaje
  Serial.println(out1); // enviar por el puerto serial
  delayMicroseconds(100);
}
```

Anexo 2. Programa de Matlab para guardar los datos adquiridos por el Arduino

```
clear all
tmax = 6; % tiempo de medición
rate = 3000; % muestras aproximadas por seg
v1 = zeros(1, tmax*rate*2); % vector de voltajes
t1 = zeros(1, tmax*rate*2); % vector de tiempo
i = 2;
t=0;
error=0;
p='y';
m=input('Número de pruebas anteriores:');
tipo=input('Tipo de sensor:', 's');
R=input('Radio del sensor R=');
D=input('Diámetro del núcleo de la fibra D=');
phi=D/R;
[stat, struc] = fileattrib;
PathCurrent = struc.Name;
% Puerto serial
delete(instrfind({'Port'}, {'COM3'}));
s = serial('COM3', 'BaudRate', 115200); % crea objeto s puerto serial
warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
fopen(s); % abre puerto serial

while p=='y'
  L=input('\nDistancia de la fibra L=');
  n=input('\n ndice de refracción del medio n=');
  A=L/R;
  m=m+1;
  tic % inicio de reloj
  while t<tmax
    a = fscanf(s, '%d'); % guarda valor del puerto serial en a
    t=toc; % tiempo transcurrido desde iniciado el reloj
    if numel(a)==1 % Condición que corrige error: numel(a)=0 (error de
lectura)
      v1(i)=a(1);
      t1(i)=t;
    else
      v1(i)=v1(i-1);
      t1(i)=t;
      error=error+1;
    end
    i=1+i;
  end
end
```

```

end
v1=v1(1,2:i-1);%recorta vector de voltaje al numero valores leidos
v1=v1*5/1024;%ConversiÛn a voltaje
t1=t1(1,2:i-1);%recorta vector de tiempo al numero valores leidos
fprintf('%g s de captura a %g samp/s con %g errores\n',t,i/t,error);
%crear las rutas (Path) para carpetas y archivos
FolderName = ['experimento' num2str(m)];
PathFolder = [PathCurrent '/RESULTADOS/' FolderName];
NameFile = [PathFolder '/data.txt'];
%graficar
f= figure;
set(f,'Name',[FolderName 'graph'],'NumberTitle','off');
plot(t1,v1);
axis([0 t 0 5.1]);
grid on;
title('Voltaje en el receptor')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
% crear las carpetas para guardar los resultados
mkdir([PathCurrent '/RESULTADOS'], FolderName);
% crear un archivo .txt con datos
fileID = fopen(NameFile,'w');
table=[t1; v1];
fprintf(fileID, 'Tipo de sensor: %s\r\nRadio del sensor:
R=%f\r\nDiametro del nucleo de la fibra: D=%f\r\n',tipo,R,D);
fprintf(fileID, 'Distancia de la fibra: L=%f\r\nIndice de refraccion:
n=%f\r\nDistancia adimencional: A=%f\r\nDiametro adimencional:
phi=%f\r\n',L,n,A,phi);
fprintf(fileID,'%s\t\t %s\r\n','Tiempo','Voltaje');
fprintf(fileID,'%2.8f\t%2.8f\r\n', table);
fclose(fileID);
% guardar figura en la carpeta
saveas(f, [PathFolder '/graph.fig'], 'fig');
i=2;
t=0;
error=0;
p=input('Desea realizar otra prueba (y/n)','s');
end
fclose(s);

```

Anexo 3. Programa de Matlab que promedia los voltajes de todas las pruebas realizadas.

```

clear all
m=1;
mmax=input('Ingrese el n'mero de experimentos:');
vprom=ones(1,mmax);
aprom=ones(1,mmax);
[stat,struc] = fileattrib;
PathCurrent = struc.Name;
while m<=mmax
    FolderName = ['experimento' num2str(m)];
    PathFolder = [PathCurrent '/RESULTADOS/' FolderName];
    NameFile = [PathFolder '/data.txt'];
    arch=fopen(NameFile);
    R=fscanf(arch, '%s%s%s%s\n%s%s%s R=%f\n',1);
    L=fscanf(arch, '%s%s%s%s%s%s%s\n%s%s%s%s L=%f\n',1);
    w=fscanf(arch, '%s%s%s%s%s\n%s%s%s\n%s%s\n',1);
    VT= fscanf(arch, '%g %g', [2 inf]);
    fclose(arch);
    t1=VT(1,:);
    v1=VT(2,:);
    A=(L+0.05)/R;
    aprom(m)=A;

```

```

v4p =zeros(1,length(t1));
c=1;
c0=0;
cp=0;
while t1(c)<3
    c=c+1;
end
while c<=length(t1)
    if v1(c)==0
        if v1(c-1)==0
            c0=c0+1;
            if c0>10
                vprom(m)=0;
                c=length(t1);
            elseif c==length(t1)
                v4p=v4p(1,1:cp);
            end
        elseif c==length(t1)
            v4p=v4p(1,1:cp);
        else
            c0=0;
        end
    else
        cp=cp+1;
        v4p(cp)=v1(c);
        if c==length(t1)
            v4p=v4p(1,1:cp);
        end
    end
    c=c+1;
end
if vprom(m)~=0
    c=1;
    cp=0;
    vp =zeros(1,length(v4p));
    while c<=length(v4p)
        if v4p(c)<2.5*mode(v4p) && v4p(c)>(mode(v4p)/2.5)
            cp=cp+1;
            vp(cp)=v4p(c);
            if c==length(v4p)
                vp=vp(1,1:cp);
                vprom(m)=mean(vp);
            end
        elseif c==length(v4p)
            vp=vp(1,1:cp);
            vprom(m)=mean(vp);
        end
        c=c+1;
    end
end
m=m+1;
end
table5=[aprom; vprom];
ex5=fopen('respuesta1.txt','w');
fprintf(ex5,'%2.8f\t%2.8f\r\n', table5);
fclose(ex5);
f= figure;
set(f,'Name','respuesta1','NumberTitle','off');
plot(aprom,vprom);
axis([0.3 1 0 max(vprom)+0.1]);
grid on;
xlabel('Distancia Adimencional')
ylabel('Voltaje (V)')
saveas(f, [PathCurrent 'respuesta1.fig'], 'fig');

```